



HAL
open science

État des connaissances sur les effets sur la santé liés à la profession de personnels navigants et sur la qualité de l'air dans les cabines d'avion

Francois Gaie-Levrel, Yann Barguil, Bruno Chenuel, Jean Dominique Dewitte, Danièle Jargot, Jaouad Iram, Olivier Joubert, Florian Nachon, Ndeye Coumba Ndiaye, Audrey Malrat-Domenge, et al.

► To cite this version:

Francois Gaie-Levrel, Yann Barguil, Bruno Chenuel, Jean Dominique Dewitte, Danièle Jargot, et al.. État des connaissances sur les effets sur la santé liés à la profession de personnels navigants et sur la qualité de l'air dans les cabines d'avion. Saisine n°2019-SA-0075, Anses. 2023, 357 p. anses-04260805

HAL Id: anses-04260805

<https://anses.hal.science/anses-04260805v1>

Submitted on 16 Nov 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License



anses

Effets sur la santé liés à la profession de personnels navigants et sur la qualité de l'air dans les cabines d'avions

Avis de l'Anses
Rapport d'expertise collective

Octobre 2023



Connaître, évaluer, protéger

Le directeur général

Maisons-Alfort, le 11 octobre 2023

AVIS de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

relatif à l'« Etat des connaissances sur les effets sur la santé liés à la profession de personnels navigants et sur la qualité de l'air dans les cabines d'avion »

L'Anses met en œuvre une expertise scientifique indépendante et pluraliste.

L'Anses contribue principalement à assurer la sécurité sanitaire dans les domaines de l'environnement, du travail et de l'alimentation et à évaluer les risques sanitaires qu'ils peuvent comporter.

Elle contribue également à assurer d'une part la protection de la santé et du bien-être des animaux et de la santé des végétaux et d'autre part à l'évaluation des propriétés nutritionnelles des aliments.

Elle fournit aux autorités compétentes toutes les informations sur ces risques ainsi que l'expertise et l'appui scientifique technique nécessaires à l'élaboration des dispositions législatives et réglementaires et à la mise en œuvre des mesures de gestion du risque (article L.1313-1 du code de la santé publique).

Ses avis sont publiés sur son site internet.

L'Anses a été saisie le 17 avril 2019 par la Confédération française démocratique du travail (CFDT) pour la réalisation de l'expertise suivante : "Demande d'avis relatif aux conséquences sanitaires de la pollution de l'air dans les avions de ligne ».

1. CONTEXTE ET OBJET DE LA SAISINE

Depuis plusieurs années, des personnels navigants rapportent des symptômes qu'ils associent à des expositions à des odeurs inhabituelles / émanations ou à des fumées dans les cabines ou dans les cockpits d'avions. Ces symptômes, très variés et aspécifiques, ont été mentionnés dans plusieurs études et regroupés par certains auteurs sous le terme de « syndrome aérotoxique ». Ils ont pu conduire, pour certains travailleurs, à la perte de leur aptitude aéromédicale¹.

Dans la grande majorité des avions, l'air alimentant la cabine est en partie prélevé au niveau des compresseurs des moteurs. Par conséquent, ces odeurs inhabituelles ou fumées sont

¹ Aptitude aéromédicale : aptitude prononcée pour un personnel navigant par un médecin agréé par la Direction générale de l'aviation civile (DGAC) sur la capacité de ce professionnel à occuper son poste

couramment attribuées à une potentielle contamination de l'air des cabines par des composés issus de l'huile moteur ou de sa dégradation thermique, désignée dans la littérature par l'expression « fume event ».

La qualité de l'air des cabines d'avion et les phénomènes de sa contamination font ainsi l'objet d'une attention croissante de la part des personnels navigants et des autorités de l'aviation civile.

Des recommandations internationales sont également émises par l'organisation de l'aviation civile internationale (OACI) dans le contexte de la mise en péril de la sécurité aérienne dans le cas de contamination par des vapeurs d'huile moteur sur des vols commerciaux.

Dans ce contexte, l'Anses a reçu en 2019 une saisine de la part de la Confédération française démocratique du travail (CFDT) qui regroupe les demandes de l'Association des victimes du syndrome aérotoxique (AVSA), du Syndicat des pilotes de ligne (SPL), du Syndicat national du personnel navigant (SNPNC-FO) et du Syndicat national des pilotes de ligne (SNPL) sollicitant une expertise scientifique sur les conséquences sanitaires de la pollution de l'air dans les avions de ligne. En accord avec les demandeurs, le périmètre de la saisine a été révisé afin de dresser un état des connaissances sur :

- Les effets sur la santé liés à la profession de personnel navigant. Ce bilan comprend, une analyse et une synthèse des données chez l'humain notamment épidémiologiques sur les facteurs de risque pour la santé des personnels navigants ainsi qu'une analyse des données relatives au syndrome aérotoxique à l'origine de la saisine (chapitre 3 du rapport).
- La pollution chimique de l'air des cabines d'avions d'une part en l'absence d'évènement particulier et d'autre part lors de « *fume events* ». Ce bilan documente les sources d'émission des polluants, les facteurs d'influence, la nature des polluants et leur concentration. L'expertise porte sur les contaminants de l'air d'origine minérale ou organique, qu'ils soient gazeux ou particulaires, quelle que soit leur taille (chapitre 4 du rapport). Les polluants biologiques sont exclus du champ de l'expertise.
- Les différentes recommandations institutionnelles existantes sur les moyens de prévention des évènements de contamination de l'air de la cabine et la conduite à tenir lors de ces incidents en vol et après les vols (chapitre 5 du rapport).

La demande initiale des syndicats incluait une évaluation quantitative des risques sanitaires (EQRS) pour les personnels navigants. Il a été convenu de réaliser dans un premier temps, l'expertise sur les trois volets présentés, et d'évaluer la pertinence et la faisabilité d'une EQRS si les données identifiées dans ce cadre le permettent.

2. ORGANISATION DE L'EXPERTISE

L'expertise a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – Prescriptions générales de compétence pour une expertise (Mai 2003) ».

L'Anses a mis en place un groupe de travail *ad hoc* après appel public à candidature (GT Avions), rattaché au comité d'experts spécialisé (CES) « Évaluation des risques liés aux milieux aériens » pour l'instruction de cette saisine.

La réalisation des travaux s'est également appuyée sur les compétences de différentes unités de l'Anses notamment l'unité en charge de l'évaluation des risques liés à l'air, la mission transversale portant sur les alertes et les vigilances sanitaires.

Les travaux ont été présentés au CES tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques entre novembre 2019 et juillet 2023 (mandats 2017-2020 et 2020-2023). Ils ont été adoptés par le CES « Évaluation des risques liés aux milieux aériens » réuni le 3 juillet 2023.

L'Anses analyse les liens d'intérêts déclarés par les experts avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise.

Les déclarations d'intérêts des experts sont publiées sur le site internet : <https://dpi.sante.gouv.fr/>.

Méthodologie générale

Pour répondre aux questions de l'expertise, plusieurs revues de la littérature scientifique ont été réalisées en suivant les recommandations de l'Anses (Anses, janvier 2023). Elles ont suivi les étapes visant à recenser et sélectionner les données disponibles, en évaluer la qualité puis synthétiser les plus pertinentes pour établir l'état des lieux des connaissances sur les effets sanitaires liés à la profession de personnel navigant et celui sur les composés chimiques gazeux et particulaires présents dans l'air des cabines d'avion. Les bases de données bibliographiques Pubmed, Scopus, complétées, pour les thématiques portant sur les composés présents dans l'air des cabines et le syndrome aérotoxique, par Google Scholar, ont été consultées jusqu'en décembre 2022, avec une veille bibliographique assurée jusqu'au 1er juin 2023.

La qualité des études a été évaluée à partir de grilles existantes en fonction du type d'études (Armstar2 pour les revues, et grilles de lecture pour les articles princeps) afin d'inclure les données les plus pertinentes au regard des questions de l'expertise.

La littérature grise² prise en compte est issue de la recherche des références sur les sites internet consultés d'organismes et institutions en lien avec l'aviation civile (EASA, IATA...)³, la santé des travailleurs (INRS, NIOSH...)⁴ et la santé environnementale (US-EPA...) ⁵ de septembre à décembre 2021.

Les données de santé du Réseau national de vigilance et de prévention des pathologies professionnelles (RNV3P) ont été extraites afin d'identifier les maladies professionnelles des personnels navigants qui ont consulté les centres de consultations des pathologies professionnelles et environnementales (CCPPE). Les données du Système d'information des Centres antipoison (SICAP) ont été extraites afin d'identifier les cas rapportés suite à une suspicion d'altération de la qualité de l'air dans les avions.

La collecte des informations nécessaires à la conduite de cette expertise s'est également appuyée sur différentes auditions de parties prenantes de l'aviation civile :

² NB : la littérature grise est ce qui est produit par toutes les instances du gouvernement, de l'enseignement et la recherche publique, du commerce et de l'industrie, sous un format papier ou numérique, et qui n'est pas contrôlé par l'édition commerciale (<https://www.cairn.info/revue-i2d-information-donnees-et-documents-2015-1-page-30.htm#no1>).

³ EASA : Agence européenne de la sécurité aérienne ; IATA : Association du transport aérien international

⁴ INRS : Institut national de recherche et de sécurité ; NIOSH : National Institute for Occupational Safety and Health

⁵ US-EPA : United States Environmental Protection Agency

- un professeur en conception d'aéronefs, mécanique du vol et systèmes d'aéronefs à l'Université des sciences appliquées de Hambourg (8 juillet 2021)
- la Direction de la Sécurité de l'Aviation Civile (DSAC) et de l'Organisme pour la Sécurité de l'Aviation Civile (OSAC) (14 janvier 2022)
- la compagnie Air France (service de maintenance (24 juin 2022) et service médical (10 mai 2022))
- la compagnie Corsair (12 septembre 2022)
- le service médical d'urgences et de soins de l'aéroport Charles de Gaulle (10 juin 2022)
- l'association française des victimes du syndrome aérotoxique (13 septembre 2022)

Enfin, une consultation internationale d'agences ou organismes institutionnels dans le domaine de la sécurité aérienne a été organisée entre juin 2022 et octobre 2022 pour recueillir des informations relatives aux recommandations institutionnelles existantes sur les moyens de prévention des événements de contamination de l'air des cabines.

Le tableau 1 répertorie les questions abordées lors de l'expertise et les méthodes et outils déployés pour y répondre.

Tableau 1 : méthodologie générale

Question principale	Sous questions	Méthode
Comment se caractérise la population d'étude ?	<p>Quelles sont les caractéristiques des personnels navigants en France : nombre, activités, facteurs environnementaux et conditions de travail, réglementation associée ?</p> <p>Quelles sont les données de vigilance et de sinistralité associées à cette profession en France ?</p>	<p>Recherche des données institutionnelles : réglementaire, prévoyance</p> <p>Extraction des données des bases de données de vigilance et de sinistralité</p>
Quels sont les effets sur la santé liés à la profession de personnel navigant ?	<p>Quelles sont les maladies observées chez les personnels navigants ?</p> <p>Quelles sont les données relatives au « syndrome aérotoxique ? »</p>	<p>Revue de la littérature (scientifique, grise) à partir des 5 étapes* recommandées par l'Anses portant sur les études sur les effets sur la santé chez les personnels navigants (épidémiologie, études de cas, revue de la littérature)</p> <p>Exploitation des données disponibles pour les passagers et extrapolables au personnel navigant.</p>

Question principale	Sous questions	Méthode
Quelles sont les connaissances sur la qualité de l'air dans les cabines d'avion ?	<p>Comment s'opère le renouvellement de l'air dans la cabine?</p> <p>La qualité de l'air des cabines est-elle réglementée ?</p> <p>Quelles sont les sources des polluants mesurés dans l'air des cabines ?</p> <p>Qu'est-ce qu'un « fume event » et comment est-il caractérisé ?</p> <p>Quels sont les composés gazeux et particulaires mesurés en cabine et à quel niveau de concentration, d'une part en l'absence d'évènement particulier/en conditions habituelles de vol et d'autre part lors de « fume events » ?</p>	<p>Echange avec les parties prenantes lors d'auditions (Ingénierie aéronautique et constructeurs)</p> <p>Revue de la littérature (scientifique et grise) à partir des 5 étapes* recommandées par l'Anses documentant les sources, polluants, gammes de concentration dans l'air des cabines ou cockpit d'avions</p>
Quelles sont les recommandations institutionnelles existantes sur les moyens de prévention des événements de contamination de l'air de la cabine et la conduite à tenir lors de ces incidents en vol et après les vols ?		<p>Examen de la littérature grise et informations recueillies dans le cadre d'une consultation internationale afin de décrire les mesures existantes en termes de prévention et de gestion</p> <p>Echange avec les parties prenantes lors d'auditions (DSAC, compagnies aériennes)</p>
<p>*Cinq étapes suivies pour la revue de la littérature suivant la méthodologie préconisée par l'Anses : identification des références disponibles, sélection des références pertinentes, confirmation de l'éligibilité des études sélectionnées, évaluation de la qualité des études éligibles, réalisation de la synthèse</p>		

3. ANALYSE ET CONCLUSIONS DU CES

3.1. Population des personnels navigants en France

Dans cette expertise, le terme « **personnel(s) navigant(s)** » regroupe plusieurs catégories de professionnels définies par le code des Transports exerçant différentes activités ou missions au sein d'un avion, également appelé aéronef (conduite, service à bord, essais...).

3.1.1. Description de la population

Sur la base des données de la Caisse des retraites complémentaire du personnel navigant professionnel de l'aéronautique civile (CRPN), le nombre de personnels navigants en France est estimé à près de 33 000, en 2020, principalement dans le secteur du transport public. Les données identifiées et retenues dans le cadre de cette expertise portent exclusivement sur les personnels navigants techniques (PNT), correspondant aux postes de pilotage, et les personnels navigants commerciaux (PNC), membres d'équipage de cabine.

Les personnels navigants sont exposés à différents facteurs environnementaux et à des conditions de travail particulières, notamment : température, humidité, pression, flux d'air,

bruit, niveau d'oxygène, rayonnement cosmique, vibrations, durée de travail, travail posté, position sédentaire, décalage horaire, tabagisme passif⁶, etc.

Les durées de travail et d'aptitude sont réglementées en France par le Code de l'aviation civile. Un suivi médical spécifique de ces personnels est effectué régulièrement dans le cadre de la médecine du travail et du renouvellement de l'aptitude aéromédicale.

3.1.2. Données issues des réseaux de vigilance

L'analyse des données de la base du RNV3P, pour les années 2001 à 2021, a permis d'identifier 101 pathologies en relation avec le travail (PRT) concernant les personnels navigants pour lesquelles l'exposition professionnelle a une imputabilité a minima faible.

Les psychopathologies et les cancers sont les maladies les plus représentées, puis viennent les troubles du sommeil, les « intoxications » correspondant à des manifestations cliniques rapportées à des substances, les troubles musculo-squelettiques, les troubles de l'audition et d'autres maladies de natures diverses.

Parmi ces 101 PRT, vingt dossiers mentionnent des expositions liées à l'air des cabines (« fume event », « odeur âcre / d'huile brûlée... », etc.), rapportées par les patients, ou des signes cliniques qui pourraient être en relation avec ces expositions. En complément, trois dossiers non conclus en PRT mentionnaient également ces expositions et/ou ces signes cliniques.

L'analyse des cas rapportés aux centres antipoison (CAP) a permis d'identifier 66 événements, impliquant 112 personnes entre 2000 et 2021, dont 108 membres d'équipage, décrits par la perception d'une odeur inhabituelle, de « vapeur/gaz » ou de fumée. Lorsque l'information était connue, l'odeur perçue était décrite majoritairement comme une odeur de « chaussettes mouillées », de kérosène et d'« huile moteur ». La plupart des personnes (92,9 %) a déclaré des symptômes, tous de faible gravité et d'évolution favorable lorsque des éléments sur le suivi de l'évolution étaient disponibles (50 % des cas). Les symptômes les plus fréquents étaient neurologiques (céphalées, vertiges, paresthésie), suivis par des troubles digestifs (nausées, diarrhée, irritation buccale) et respiratoires (douleurs oropharyngées, irritation des voies aériennes supérieures, toux).

Il faut noter que ces bases de vigilance ne permettent pas d'avoir une image représentative des fréquences réelles de maladies dans un secteur donné car il ne s'agit pas de dispositifs de surveillance sanitaire.

3.2. État des connaissances sur les effets sur la santé liés à la profession de personnel navigant

Les effets sur la santé liés à la profession de personnel navigant ont été identifiés à partir des revues épidémiologiques et des études de cohortes ou transversales étudiant la mortalité et la morbidité en lien avec les conditions d'exposition ou de travail des personnels navigants.

⁶ L'exposition au tabagisme passif a cessé en 2007 avec l'entrée en vigueur du Décret n° 2006-1386 du 15 novembre 2006 fixant les conditions d'application de l'interdiction de fumer dans les lieux affectés à un usage collectif ; à noter que certains vols étaient déjà non-fumeurs depuis les années 1990.

D'après la monographie n° 124 de 2020 du Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) sur la cancérogénicité du travail de nuit posté⁷, cette profession est particulièrement concernée par le travail pendant les heures normales de sommeil de la population générale. et également co-exposée aux rayonnements ionisants, notamment cosmique, qui dépendent de l'altitude. Le premier rapport relatif à la qualité de l'environnement des cabines d'avions de l'Académie des Sciences américaine (*National Research Council – NRC*) soulignait en 1986 que les personnels navigants étaient exposés au tabagisme passif dans les cabines d'avions au vu de l'organisation des espaces fumeurs/non-fumeurs et du fonctionnement de la ventilation. La monographie 83 de 2004 du CIRC évaluant la cancérogénicité de la fumée de tabac et du tabagisme passif, rapporte également une exposition importante au tabagisme passif dans des locaux de travail avec zone fumeurs sans ventilation séparée ainsi qu'une exposition des personnels navigants plus élevée que celle de la population générale.

Concernant le syndrome aérotoxique, les références sont principalement des études de cas et des études investiguant les polluants pouvant être à l'origine des symptômes ressentis notamment par la recherche de biomarqueurs.

3.2.1.Cancers

L'analyse de la littérature complétée par les résultats des monographies du CIRC ont permis de conclure à une augmentation de l'incidence de certains cancers, tels que les cancers de la peau (épidermoïdes et mélanomes) et les leucémies chez les personnels navigants. D'après la littérature et les monographies du CIRC, les rayonnements solaire et cosmique pourraient en être la cause.

Concernant les cancers de la prostate et du sein, maladies cancéreuses retrouvées chez les personnels navigants et identifiées dans la littérature, il est plus difficile de conclure sur une augmentation du risque dans cette population, en raison le plus souvent d'un manque d'études disponibles et de facteurs de confusion potentiels non pris en compte dans les analyses. Le CIRC a, quant à lui, conclu qu'il existait des preuves limitées chez l'humain, mais suffisantes chez l'animal et solides au niveau mécanistique pour démontrer le lien entre ces maladies et le travail de nuit posté. Le CIRC a également conclu à un niveau de preuve suffisant pour le cancer du poumon en lien avec le tabagisme passif. Il n'est pas non plus possible de conclure pour les autres maladies cancéreuses identifiées dans la littérature (lymphome non hodgkinien (LNH), cancers du col de l'utérus, des ovaires, du cerveau, de la thyroïde, colo-rectal, de la vessie et des testicules) du fait d'un manque d'études ou de la présence de données inconsistantes.

A noter que le CIRC a émis des conclusions sur d'autres maladies cancéreuses en lien avec le travail de nuit posté, et les rayonnements cosmique et solaire. Ces maladies n'ont pas été reprises dans ce rapport car elles n'ont pas été retrouvées dans la revue de la littérature réalisée dans le cadre de cette expertise.

Une synthèse de ces résultats est présentée dans le Tableau 2 Tableau 2 (cf. Annexe).

⁷ Le travail de nuit posté comprend le travail, y compris les voyages transmériidiens aériens, pendant les heures normales de sommeil de la population générale. Le décalage, ou la perturbation, des rythmes circadiens physiologiques normaux sont les effets les plus importants du travail de nuit posté (CIRC, 2020).

3.2.2. Maladies non cancéreuses

Pour les maladies autres que les cancers, les études identifiées dans la revue de la littérature ont porté sur la survenue de maladies cardiovasculaires, d'effets respiratoires, d'effets sur la reproduction féminine, de troubles musculo-squelettiques (TMS), de troubles psycho-sociaux chez le personnel navigant et les passagers. Un manque de données récentes sur les maladies respiratoires chez le personnel navigant est souligné. Il n'est pas possible de conclure sur une association entre la profession de personnel navigant et le risque de survenue de ces maladies du fait de données insuffisantes se limitant à des données descriptives par comparaison à la population générale.

Une synthèse de ces résultats est présentée dans le Tableau 3 (cf. Annexe).

Le terme « syndrome aérotoxique » a été introduit à la fin des années 90 par deux auteurs, Balouet et Winder, et désigne un regroupement de symptômes évoqués par des personnels navigants ou observés par le personnel de santé, suite à des événements d'odeurs, fumées ou émanations, qui pourraient être en lien avec une contamination de l'air des cabines d'avion par des huiles moteurs ou fluides hydrauliques. Les symptômes décrits sont divers : irritations des yeux, troubles digestifs, troubles respiratoires, troubles neurologiques, etc. Selon ces auteurs, ces contaminations supposées de l'air de la cabine pourraient également conduire à long terme à des effets principalement d'ordre neurologique ou neuropsychiatrique.

L'expertise du corpus de données identifiées conforte la conclusion du *National research of council* (NRC) de 2002 selon laquelle, en raison d'un manque d'informations, un niveau de preuve faible est attribué à la désignation d'un syndrome spécifiquement lié à l'exposition à divers polluants ou produits de décomposition qui proviennent de fuites d'huiles moteur ou de fluides hydrauliques. En effet, Balouet et Winder ont publié des études courtes, souvent avec des méthodologies peu détaillées, dans des revues sans comité de lecture, et dont les résultats n'ont pas été reproduits par d'autres équipes de recherche. De plus, les données récentes sont issues d'études de cas reposant sur l'analyse clinique et la formulation d'une série d'hypothèses. Elles ne permettent pas d'établir un lien entre, d'une part les troubles et les biomarqueurs identifiés, d'autre part une contamination de l'air de la cabine d'avion. Elles reposent sur un nombre limité de sujets et ne fournissent pas toujours le détail des méthodes utilisées.

En complément, des recherches ont été conduites sur les biomarqueurs au regard des substances incriminées, centrées sur l'hypothèse d'une exposition au tri-ortho-crésylphosphate (ToCP), présent dans les huiles moteur, ou plus récemment par une exposition à des particules ultrafines. Les investigations actuelles portent sur des marqueurs d'atteinte neuronale (cholinestérases, *neuropathy target esterase*, auto-anticorps). Dans ces études, plusieurs limites ont été soulevées, notamment le manque de valeur basale pour chaque sujet (absence de dosage des biomarqueurs avant exposition), le manque d'étude sur l'évolution dans le temps des niveaux de biomarqueurs en fonction de la reprise ou non de l'activité professionnelle et la non prise en compte des antécédents traumatologique et infectieux.

3.3. État des connaissances sur les polluants gazeux et composés particuliers dans l'air des cabines d'avions

3.3.1. Fonctionnement de la ventilation

L'air fourni au cockpit et à la cabine d'un avion pressurisé en vol passe par un système de conditionnement d'air (*environmental control system* - ECS). Ce dernier vise à fournir un débit d'air suffisant pour assurer une pression partielle d'oxygène répondant aux besoins physiologiques de l'équipage et des passagers et empêche l'accumulation de niveaux excessifs de dioxyde de carbone dans la cabine. Il est également conçu pour assurer une température de l'air homogène dans toute la cabine. Dans la plupart des grands avions de transport, l'air de la cabine fourni par cet ECS est issu d'une combinaison d'air prélevé dans les parties basse et haute pression des moteurs - appelé « *bleed air* » - et d'air recyclé (environ 40 à 60 %). Ce *bleed air* sert également à pressuriser le système d'eau potable à bord des avions. La plupart des avions sont équipés de systèmes de filtres de particules à haute efficacité (HEPA) utilisés pour filtrer l'air de recirculation. Au sol, l'air peut être prélevé dans le groupe auxiliaire de puissance (APU). Dans un modèle d'avions dits sans *bleed air*, l'air extérieur n'est pas prélevé au niveau des moteurs mais directement à l'extérieur de l'avion *via* une entrée dédiée et un compresseur électrique et combiné à de l'air recyclé.

3.3.2. Lignes directrices sur la qualité de l'air dans les cabines

Parmi les exigences techniques relevant du processus de certification des avions commerciaux encadré par les autorités de sécurité aérienne (EASA pour l'Europe), certaines portent sur les conditions de pression et sur la qualité de l'air des cabines. Des valeurs limites sont ainsi définies pour l'ozone (O₃) (0,1 ou 0,25 ppmv selon l'altitude de vol), le monoxyde de carbone (CO) (50 ppmv) et le dioxyde de carbone (CO₂) (0,5%). L'apport d'air neuf doit être de 0,25 kg/minute/occupant, ce qui conduit à un renouvellement total de l'air supérieur à 20 volumes par heure (20 fois le volume de la cabine par heure). En France, la qualité de l'air des cabines n'est pas spécifiquement réglementée par le code des transports ou le code de l'aviation civile, mais les mesures de prévention des risques chimiques précisées dans le Code du travail s'appliquant, les valeurs limites d'exposition professionnelles définies pour certains polluants (article R 4412-149 et R 4412-150) doivent être respectées.

3.3.3. Sources de pollution

Les sources de pollution de la cabine d'avion sont multiples, du fait de la conception même des avions. Elles peuvent être internes à la cabine en lien avec les matériaux de construction, les matériaux constitutifs du mobilier, la préparation des repas, des défaillances électriques, la présence humaine, etc. Elles peuvent être également externes à la cabine comme par exemple une contamination du *bleed air* par l'air extérieur pollué (émissions liées au trafic aéroportuaire, émissions des autres avions, pollution atmosphérique, procédures de dégivrage, etc.) ou par de l'huile moteur ou des lubrifiants en provenance des moteurs ou compresseurs ou bien encore par les produits de décomposition issus de leur pyrolyse (cf. Figure 1).

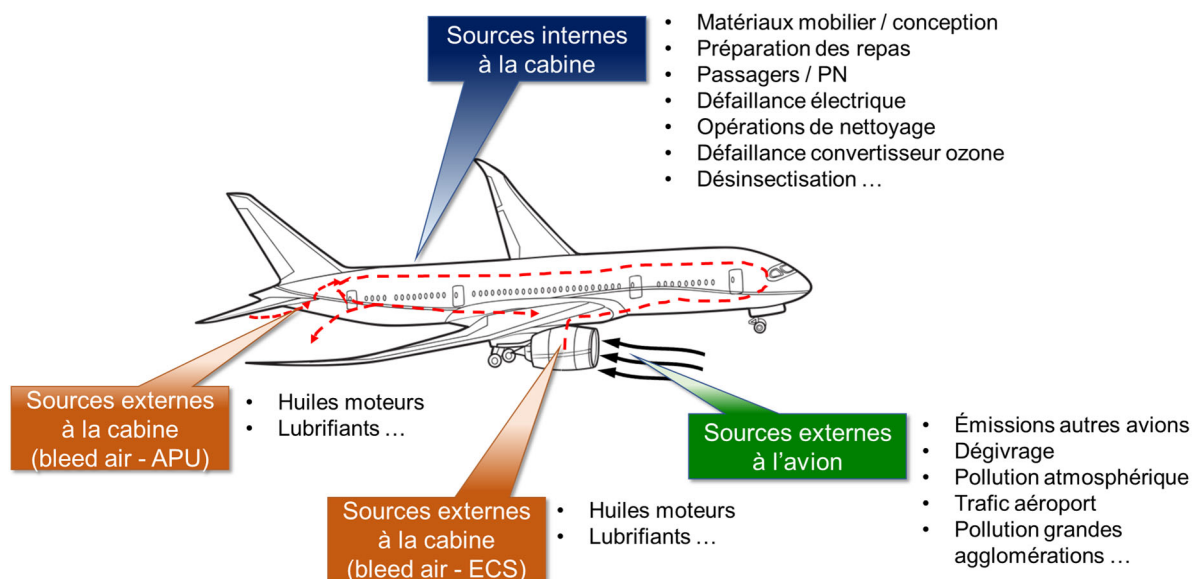


Figure 1 : Schéma des sources de pollution pouvant affecter l'air d'une cabine d'avion

Dans la littérature scientifique, le terme « *fume events* » est couramment utilisé pour désigner des épisodes d'odeurs, fumées ou brouillards accidentels à l'intérieur d'un avion généralement attribués à une contamination du *bleed air* par des huiles moteur. La désignation de ces manifestations varie selon les organismes et instances de l'aviation civile. La Direction générale de l'aviation civile (DGAC) utilise par exemple la terminologie « événement feu, fumée, odeur (FFO) ».

Pour expliquer ces événements d'odeurs, fumées ou brouillards accidentels, l'hypothèse la plus couramment étudiée est celle d'une contamination du *bleed air* par de l'huile moteur, du fluide hydraulique (sur-remplissage, fuite, joint défectueux, etc.) ou par des sous-produits issus de leur combustion (totale ou partielle) ou de leur pyrolyse. C'est ce qui a dirigé les recherches d'organophosphorés dont les tricrésylphosphates (TCP) dans l'air en lien avec leur présence dans les huiles moteurs en tant qu'additif anti-usure et lubrifiant. Néanmoins, cette hypothèse n'est pas encore objectivée par des mesures de polluants effectuées en vol de routine lors de tels événements. 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.

Les autres sources de contamination n'ont pas fait l'objet d'investigation, hormis de rares études anciennes simulant des opérations de désinsectisation. Certaines études suggèrent de s'intéresser également au processus de dégivrage.

La revue de la littérature effectuée n'a par ailleurs pas permis d'identifier d'études permettant de comprendre les processus d'émission des polluants retrouvés dans l'air des cabines, ni les transformations physico-chimiques des polluants potentiellement émis dans l'ensemble du système d'alimentation en air, depuis les parties basse et haute pression des moteurs en passant par le système de conditionnement de l'air et les conduits, jusqu'au cockpit/cabine.

Ainsi l'origine des émanations ou odeurs inhabituelles n'étant pas établie, il convient de ne pas restreindre la problématique d'une potentielle contamination de l'air de la cabine aux *fume*

events. L'expression « évènement de contamination de l'air en cabine (évènement CAC) » est plus adaptée, quelle que soit la source de cet évènement.

3.3.4. Données de concentration dans l'air des cabines d'avion

Deux revues de synthèse récentes ont dressé un état des lieux des connaissances de la pollution dans l'air des cabines d'avions (Chen *et al.* 2021 et Hayes *et al.* 2021). Elles ont été complétées par 19 références de la littérature scientifique et littérature grise apportant d'autres résultats. Seules les données issues de mesures effectuées au cours de vols non-fumeurs ont été analysées au cours de l'expertise.

Les données de concentrations sont issues de mesures réalisées en quelques points fixes de la cabine, parfois en cockpit, avec des stratégies différentes. L'objectif des mesures réalisées était soit d'identifier les composés supposés être émis lors d'évènements, soit de dresser un panorama des polluants présents dans l'air des cabines d'avion. Aucune mesure individuelle d'exposition des personnels navigants n'a été réalisée.

3.3.4.1. En l'absence d'évènement particulier

Différents types de composés ont été recherchés et mesurés dans l'air des cabines : des gaz (ozone (O₃), monoxyde de carbone (CO), etc.), des composés organiques volatils (COV), des composés organiques semi-volatils (COSV)⁸ (les organophosphorés étant les plus recherchés) et plus récemment des particules, notamment les particules ultrafines (PUF⁹). En raison de leurs propriétés physico-chimiques, ces polluants peuvent être inhalés, se trouver en contact avec la peau des occupants de la cabine ou être ingérés, notamment après contact main-bouche.

L'ozone est le principal polluant de l'air ambiant préoccupant à l'altitude de croisière. À haute altitude, notamment aux latitudes élevées, les teneurs élevées d'O₃ dans l'air extérieur peuvent conduire à des concentrations élevées dans la cabine. Depuis 2013, il est recommandé que des convertisseurs d'ozone soient installés afin de limiter les concentrations dans l'air intérieur des cabines. L'ozone peut également réagir avec certains COV dont les terpènes pour donner naissance notamment à des aldéhydes et des aérosols secondaires.

Concernant les **COV**, de très nombreux composés appartenant à diverses familles chimiques ont été mesurés : composés carbonylés, aromatiques, alcanes, composés halogénés, terpènes, alcools, etc.

Concernant les **particules**, quelques études rapportent la présence de PUF dans l'air des cabines d'avions. Toutefois, du fait des méthodes utilisées, les particules mesurées ne correspondent pas toujours uniquement à des PUF, mais englobent des particules de tailles pouvant aller jusqu'à 25 µm. Les concentrations en nombre ou massiques ne sont généralement pas rapportées en lien avec une distribution granulométrique permettant d'apprécier le caractère ultra-fin de l'aérosol mesuré. Des concentrations plus élevées en nombre de particules sont mesurées lors de la traversée de nuages ou lors de turbulences.

⁸ Composés organiques semi-volatils qui peuvent se retrouver dans l'air sous plusieurs formes (gazeuse, particulaires - aérosol liquide - brouillard - ou solide – poussières)

⁹ PUF : particules de diamètre < 100 nm

La composition chimique de ces particules est rarement investiguée, si ce n'est la recherche **d'organophosphorés** dont le phosphate de tri-n-butyle (TnBP) et le phosphate de dibutylphényle (DBPP), ainsi que les différents isomères du tricrésylphosphate (TCP). Quelques mesures de carbone suie (BC - black carbon) et retardateurs de flamme bromés ont également été effectuées.

La plupart des campagnes de mesures en vol diffèrent entre elles en termes de conception expérimentale, d'approche analytique et de présentation des résultats.

Les études mettent en œuvre des méthodes de mesure généralement robustes pour identifier et quantifier les COV. Concernant les COSV, les méthodes de mesure ne prennent pas toujours en compte les phases particulaire et gazeuse, ce qui conduit à une sous-estimation des concentrations. Concernant les mesures de particules, la méthodologie expérimentale et la stratégie instrumentale mises en œuvre dans les études identifiées ne permettent pas de caractériser précisément en terme de granulométrie et de composition la phase particulaire en suspension dans l'air des cabines d'avions.

De manière générale, les conditions de calibration/étalonnage, les conditions de conservation et de transport des échantillons, le délai entre analyse et prélèvement, la mise en œuvre ou non de blancs de terrain, d'échantillons répliqués, la préparation des échantillons analytiques et les performances de la méthode (domaine d'application, rendements du prélèvement, sensibilité analytique) ne sont quasiment jamais documentés. Cette variabilité méthodologique pourrait expliquer en partie les différences sur les résultats obtenus. Hormis pour les mesures de concentration en COV totaux et en particules réalisées en temps réel, les durées de prélèvement ne sont pas précisées dans les études ou ne sont pas adaptées.

Ainsi, si l'identité des polluants mesurés n'est pas remise en question, la qualité des données de mesure est insuffisante pour que les gammes de concentrations et les moyennes rapportées soient considérées comme représentatives de l'ensemble des cabines d'avions. Elles sont détaillées à titre informatif dans le tableau 4 en annexe.

3.3.4.2. Lors de fume events

Seules trois études documentent des données de mesures en cabine réalisées lors de vols au cours desquels des *fume events* ont été rapportés, et leurs résultats ne permettent pas de caractériser ces événements : soit les concentrations rapportées ne sont pas différentes de celles des vols sans événement, 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.

3.3.4.3. Polluants mesurés sur les filtres HEPA et dans les conduits de ventilation

Six études se sont intéressées aux polluants présents dans les filtres HEPA, sur les conduits de ventilation et sur les surfaces intérieures des cabines telles que les sièges. Ces études mettent en évidence la présence de particules et de composés organiques semi-volatils dont les isomères du TCP et d'autres organophosphorés.

3.4. Prévention des évènements CAC et la conduite à tenir lors de ces incidents

Au niveau international, il existe des recommandations de sensibilisation et de formation à destination des personnels navigants et des techniciens d'entretien des aéronefs afin :

- de réduire les évènements CAC, en particulier les émanations d'huile ou de fluide hydraulique des moteurs ou de l'APU ;
- d'améliorer l'identification de ces événements par les personnels navigants en vol;
- de connaître la conduite à tenir en cas d'incidents.

L'expertise a identifié deux lettres « information sécurité » émises par les autorités de la sécurité aérienne française (2020) et américaine (2018) recommandant des bonnes pratiques pour la prévention des émanations ou des odeurs de fumées dans les cabines d'avions ou le poste de pilotage d'avions ainsi que pour la conduite à tenir lors de ces incidents. Ces lettres reprennent des éléments des recommandations de l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) publiés en 2015.

En France, il n'existe pas de cadre réglementaire ni d'exigence spécifique concernant la contamination de l'air des cabines d'avions ni la gestion en vol ou après le vol. Des bonnes pratiques sont proposées avec l'objectif principal de limiter les sources de pollution et impliquent des responsables et acteurs différents (organismes de maintenance, exploitants, personnels navigants).

Les auditions de deux compagnies aériennes, Air France et Corsair, ont montré la difficulté qu'elles rencontrent pour traiter les problématiques d'odeurs. Cependant, elles y travaillent avec les constructeurs. Des procédures de maintenance ou des modifications des avions sont mises en œuvre et les personnels navigants sont formés et informés sur la problématique des émanations/odeurs en cabines, les conduites à tenir pendant le vol et après le vol.

3.5. Conclusions du CES

Considérant l'état des connaissances sur les effets sur la santé associés à la profession de personnel navigant, le CES Air conclut que :

- L'incidence plus élevée des cancers de la peau (épidermoïdes et mélanomes) et des leucémies chez les personnels navigants, par rapport à la population générale pourrait être expliquée par leurs expositions aux rayonnements solaire et cosmique.
- Le faible nombre d'études et la non prise en compte des facteurs de confusion potentiels ne permettent pas de conclure sur l'augmentation du risque de cancers de la prostate et du sein chez les personnels navigants par rapport à la population générale. Le CIRC a, quant à lui, conclu qu'il existait des preuves limitées chez l'humain, mais suffisantes chez l'animal et au niveau mécanistique pour montrer le lien entre les cancers du sein et de la prostate et le travail de nuit posté.
- Le faible nombre d'études concernant les maladies non cancéreuses, ne met en évidence à ce jour aucune augmentation du risque de maladies cardiovasculaires et respiratoires, de troubles psycho-sociaux et de troubles musculo-squelettiques ni d'effets sur la reproduction de la femme chez les personnels navigants.

- Le terme « Syndrome aérotoxique » introduit en 1999 n'est pas une entité nosologique consensuelle. Les symptômes rapportés par les personnels navigants sont divers et aspécifiques, ce qui rend difficile la caractérisation d'un syndrome clinique.
A l'instar du *National Research of Council (NRC)* en 2002, le CES conclut à un niveau de preuve faible d'un syndrome spécifiquement lié à l'exposition à divers polluants ou produits de décomposition qui proviennent de fuites d'huiles moteurs ou de fluides hydrauliques.
- Les recherches récentes portent sur les effets sanitaires de certains composés de l'air de la cabine, en particulier les organophosphorés. Les données actuelles ne montrent pas d'effets sanitaires probants de ces composés aux faibles concentrations dans l'air.

Considérant l'état des connaissances sur les polluants gazeux et particulaires dans l'air des cabines d'avions, le CES Air conclut que :

- De nombreux polluants gazeux et particulaires y sont présents. Cependant, compte tenu des conditions expérimentales différentes d'une étude à l'autre, les concentrations mesurées ne peuvent être considérées comme représentatives de l'ensemble des cabines d'avion et ne sont pas comparables entre elles.
- Ces données, qui n'ont pas été collectées dans un but de surveillance ni de contrôle d'exposition, ne permettent ni de caractériser l'exposition des personnels navigants, ni d'effectuer des comparaisons avec des valeurs limites ou valeurs guides existantes.
- L'expression « *fume events* » est habituellement utilisée pour désigner des émanations ou odeurs inhabituelles dont l'origine supposée est une contamination de l'air par de l'huile moteur. L'origine de ces odeurs n'étant pas établie, il convient de ne pas restreindre la problématique d'une potentielle contamination de l'air de la cabine aux *fume events*. L'expression « événement de contamination de l'air en cabine (événement CAC) » est plus adaptée, quelle que soit la source de cet événement.
- Les données disponibles sont insuffisantes pour valider les hypothèses émises pour expliquer la plupart des événements CAC et notamment la plus courante d'une contamination du *bleed air*¹⁰ par des composés issus de l'huile moteur ou de sa dégradation thermique.

Le CES Air conclut également que les données sont insuffisantes pour conduire une évaluation quantitative des risques sanitaires liés à la pollution de l'air dans les cabines d'avion.

3.6. Recommandations du CES

Considérant le *corpus* de connaissances trop limité pour orienter des actions de prévention, le CES émet uniquement **des recommandations de veille scientifique et de recherche.**

¹⁰ L'air de la cabine de la plupart des grands avions de transport est alimenté en vol par l'air prélevé dans les parties basse et haute pression des moteurs (*bleed air*) et, au sol, par l'air prélevé dans le groupe auxiliaire de puissance (APU).

- ❑ **Afin d'améliorer les connaissances sur la santé des personnels navigants, le CES recommande** de mettre en place des études épidémiologiques qui permettraient de documenter la morbidité et la mortalité des personnels navigants, et d'en étudier le lien avec les expositions professionnelles de cette population, tout en prenant en compte des potentiels facteurs de confusion individuels.

- ❑ **Afin d'améliorer les connaissances sur un syndrome clinique qui atteindrait spécifiquement les personnels navigants, le CES recommande:**
 - d'objectiver de manière systématique, par du personnel médical, les symptômes rapportés par les personnels navigants à l'issue d'évènements CAC,
 - de conduire des travaux sur l'identification des causes des symptômes rapportés par les personnels navigants en considérant tous les facteurs d'exposition.
 - de poursuivre les travaux sur les effets des organophosphorés, en lien avec les niveaux de concentrations mesurés en cabine, et sur le développement de biomarqueurs pour le suivi de ces effets ainsi que de l'exposition.
 - d'encourager les personnels navigants rapportant des symptômes suite à une exposition liée à un évènement CAC à consulter dans les Centres de consultation de pathologies professionnelles et environnementales (CCPPE) afin de documenter leur cas.
 - Pour mieux documenter les cas au sein du RNV3P :
 - d'introduire, au sein du thesaurus des maladies, un code spécifique pour ce syndrome afin de permettre une meilleure identification des cas au sein de la base de données,
 - d'élaborer un questionnaire destiné aux médecins des CCPPE qui permette d'identifier des symptômes et les circonstances d'exposition à la suite d'évènements CAC.

- ❑ **Afin d'améliorer les connaissances sur la qualité de l'air dans les cabines d'avions, le CES recommande :**
 - de développer une stratégie de mesures (choix des vols, conception expérimentale, prélèvements, analyse et exploitation des résultats) afin d'harmoniser les approches de caractérisation de la qualité de l'air des cabines d'avion et de caractérisation de l'exposition individuelle des personnels navigants. Cette stratégie devra notamment permettre de caractériser des évènements CAC,
 - de mieux caractériser la phase particulaire, y compris les particules ultra-fines, en nombre, masse, granulométrie et composition,
 - de considérer la phase particulaire et la phase gazeuse des COSV afin de mieux caractériser leurs concentrations.

- ❑ **Afin d'améliorer les connaissances sur les causes d'évènements de contamination de l'air des cabines, le CES recommande :**
 - de mener des études permettant d'associer des mesures en temps réel à des mesures intégrées pour identifier spécifiquement les contaminants présents. Ces mesures doivent être associées à la tenue d'un journal de bord qui permettrait de tracer et

d'horodater tout incident rapporté par le personnel navigant, en complément des *reporting* obligatoires,

- d'investiguer les différentes causes possibles des évènements de contamination de l'air de la cabine.
- d'étudier les processus qui influencent les émissions de polluants dans l'ensemble du système d'alimentation en air, des sections basse pression et haute pression, jusqu'au cockpit/cabine, en passant par le système de conditionnement d'air,
- d'identifier des traceurs appropriés pour surveiller la qualité de l'air des cabines en routine, en lien avec l'identification de sources,
- d'étudier la possibilité de contamination du système d'eau potable, quand celui-ci est pressurisé par le *bleed air*.

Le CES a identifié plusieurs projets de recherche en cours qui pourraient répondre en partie à ces recommandations :

- le projet SPACE sur la mortalité par cancers et maladies non cancéreuses, liées notamment à l'exposition au rayonnement cosmique,
- les projets AviSan et CAQIII sur la potentielle contamination du *bleed air* par des composés issus des huiles moteurs, fluides hydrauliques et de leurs produits de pyrolyse, ainsi que sur les effets de ces composés sur la santé, dont la neurotoxicité,
- les projets de la FAA et l'ASHRAE sur l'évaluation de capteurs destinés à détecter une contamination du *bleed air* par des huiles ou fluides hydrauliques.

4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS DE L'AGENCE

L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail endosse les conclusions des experts.

Plusieurs facteurs environnementaux et conditions de travail en vol caractérisent les expositions des personnels navigants, qu'ils soient physiques, comme les rayonnements ionisants ou technologiques liés au conditionnement de l'air des cabines et à sa possible contamination ou encore organisationnels, comme le travail en horaires décalés et de nuit.

L'examen de la littérature, réalisé dans le cadre de cette expertise, permet de dresser un état des lieux des connaissances sur les effets sur la santé liés à la profession de personnels navigants et sur la qualité de l'air dans les cabines d'avion et de constater leur insuffisance pour permettre de réaliser une évaluation quantitative des risques sanitaires.

L'Agence souligne donc l'importance de poursuivre les travaux de recherche sur la profession de personnel navigant et en particulier d'étudier les facteurs de risque tels que l'exposition aux rayonnements solaire et cosmique qui serait à l'origine de l'incidence accrue de cancers et des leucémies observée dans cette population, en veillant à prendre en considération également l'ensemble des facteurs de risque pouvant concourir au développement de ces pathologies, dans une approche « polyexposition ». Elle recommande également d'améliorer les connaissances sur la qualité de l'air en cabine.

La motivation de l'expertise a pour origine les symptômes rapportés depuis plusieurs années par des personnels navigants ou des personnels de santé, regroupés sous le terme de « syndrome aérotoxique ». Ces symptômes ont pu parfois être associés à des odeurs inhabituelles / émanations ou fumées dans la cabine des appareils. Compte tenu des éléments identifiés dans la revue de littérature quant à l'origine de ces émanations, l'Anses préconise d'adopter l'expression d'évènement de contamination de l'air en cabine (CAC). L'analyse du corpus de données, conduite en intégrant les nouvelles publications sur près de 20 ans, conforte la conclusion du *National research Council* de 2002, qui associe un niveau de preuve faible à la désignation d'un syndrome spécifiquement lié à l'exposition à divers polluants ou produits de décompositions moteurs ou de fluides hydrauliques.

Si les symptômes décrits par les personnes ne sont pas mis en cause, l'agence souligne que le « syndrome aérotoxique » n'est pas à ce jour une entité nosologique consensuelle dans la mesure où les symptômes rapportés sont divers et non spécifiques, ce qui rend difficile la caractérisation d'un syndrome clinique.

Aussi, l'Agence encourage les études qui permettront d'apporter des connaissances sur les causes d'évènements de contamination de l'air des cabines et leurs conséquences sur la santé des personnels des personnels navigants. Sur ces questions, l'Agence souligne qu'elle a pu avoir connaissance de plusieurs travaux de recherche en cours, qui sont rappelés dans les recommandations de l'expertise.

L'Anses a également pu recenser de la documentation, tant au niveau national qu'international, relative à la prévention, l'identification et la conduite à tenir en cas d'évènement de type CAC.

Enfin, l'Agence souligne l'importance première d'objectiver les symptômes rapportés par les personnels navigants auprès des professionnels de santé qui peuvent être aidés en cela par les médecins experts des consultations de pathologies professionnelles et environnementales. Pour sa part, l'Anses accompagnera le Réseau national des centres de consultations du RNV3P dans l'amélioration des outils de recueil.

Pr Benoît Vallet

MOTS-CLÉS

avion, cabine, personnel navigant, hôtesse de l'air, pilote d'avion, steward, effets sur la santé, qualité de l'air, syndrome aérotoxique, évènement feux fumée,

airplane, aircraft, cabin, aircrew, flight attendant, aircraft pilot, steward, health effects, air quality, aerotoxic syndrome, fume event

CITATION SUGGÉRÉE

Anses. (2023). Etat des connaissances sur les effets sur la santé liés à la profession de personnels navigants et sur la qualité de l'air dans les cabines d'avion. (saisine 2019-SA-0075). Maisons-Alfort : Anses, 21 p.

ANNEXE

Tableau 2 : Synthèse des résultats de la revue de la littérature (jusqu'au 1^{er} juin 2023) et des monographies du CIRC (83, 2004 ; 100D & E, 2012 et 124, 2020) pour les maladies cancéreuses

Maladies	Conclusions de la revue de la littérature	Expositions étudiées dans la revue de la littérature	Conclusions Monographies CIRC	Agents cancérogènes - CIRC
Mélanome	++	Rayonnement cosmique Durée d'emploi Longueur des vols internationaux	++	Rayonnement solaire
Épidermoïde de la peau	++	Rayonnement cosmique Durée d'emploi Longueur des vols internationaux	++	Rayonnement solaire UVA
Leucémie	++	Rayonnement cosmique Durée d'emploi Longueur des vols internationaux	-	
Lymphome non hodgkinien (LNH)	+/-	Durée d'emploi	-	
Cancer de la prostate	+	Rayonnement cosmique Trouble du rythme circadien	+	Travail posté
Cancer du col de l'utérus	+/-	Durée d'emploi		
Cancer des ovaires	+/-	Durée d'emploi	-	
Cancer du sein	+	Durée d'emploi Trouble du rythme circadien	+	Travail posté
Cancer du cerveau	+/-	Durée d'emploi	-	
Cancer du poumon	+/-	Durée emploi Tabagisme passif	++	Tabagisme passif
Cancer de la thyroïde	+/-	Rayonnement cosmique Durée d'emploi	-	
Cancer colo-rectal	+/-	Durée d'emploi	-	
Cancer de la vessie	+/-	Durée d'emploi	-	
Cancer des testicules	+/-	Rayonnements ionisants et non ionisants	-	
++ : plusieurs études de bonne qualité et d'équipes différentes montrent des associations statistiquement significatives + : il existe au moins une étude de bonne qualité qui montre une association statistiquement significative +/- : les études sont contradictoires ou la puissance est insuffisante pour conclure à l'existence d'une association				

Tableau 3 : Synthèse des résultats de la revue de la littérature pour les maladies non cancéreuses

Maladies	Conclusion de la revue de la littérature	Expositions étudiées dans la revue de la littérature
Santé cardiovasculaire	+/-	Durée d'emploi
thrombose veineuse	+/-	Durée du voyage (passagers)
Santé reproductive femme		
fausse couche	+/-	Tabagisme
hyperprolactinémie	+	Travail posté
troubles menstruels	+/-	Travail posté
troubles du sommeil	+/-	Travail posté
érosions cervicales	+/-	Travail posté
avortement spontané	+	Hôtesse de l'air + passagers
naissances avant terme <37 semaines	+	Passagers
mortalité intra-utérine	+	Personnels navigants
Santé respiratoire		
asthme	+/-	Durée d'emploi et tabagisme
bronchopneumopathie chronique obstructive	+/-	Durée d'emploi
bronchite chronique	+	Durée d'emploi et tabagisme
Troubles musculo-squelettiques et troubles psycho-sociaux	+/-	Travail posté
lombalgies	+/-	Travail posté
dépression	+/-	Pilotes de ligne
++ : plusieurs études de bonne qualité et d'équipes différentes montrent des associations statistiquement significatives + : il existe au moins une étude de bonne qualité qui montre une association statistiquement significative +/- : les études sont contradictoires ou la puissance est insuffisante pour conclure à l'existence d'une association		

Tableau 4 : synthèse des concentrations mesurées dans l'air des cabines

Polluants (concentrations moyennes les plus élevées)	Études	Gamme de concentration
O₃	21 études (1967-2021, 1092 Vols) dont 11 portant sur des vols non-fumeurs (1999-2018) rapportées par Chen et al. 2021	0 – 275 ppb
CO	9 études (1992 - 2018, 327 vols) rapportées par Chen et al. 2021	< LOD - 9,4 ppm
CO₂	20 études (1992 - 2019, 655 vols, rapportés par Chen et al. 2021	1000 à 2000 ppm - Concentrations lors de l'embarquement plus élevées que lors des autres phases de vol. - Concentrations en Classe affaire inférieures à celles en classe économique
NO_x	2 études (1999-2002, 41 vols), rapportées par Chen et al. 2021	4,3 - 20 ppb
NO₂	3 études (1999-2002, 37 vols) rapportées par Chen et al 2021	5,2 - 252 ppb (médiane = 12 ppb)
NO	1 étude (1999, 5 vols) rapportée par Chen et al. 2021	0,3 - 81 ppb
SO₂	1 étude (1999, 5 vols, rapportée par Chen et al 2021)	30 µg/m ³
COV		0 à 3 µg.m ⁻³ (moyennes comprises entre 0,1 et 100 µg.m ⁻³)
<u>Carbonylés:</u> formaldéhyde, acétaldéhyde, nonanal, hexanal, décanal, octanal, butanal, acétone <u>Composés aromatiques</u> <u>dont terpènes:</u> limonène, toluène, benzène et m&p xylène <u>Halogénés :</u> trichloroéthylène (TCE), tétrachloroéthylène (PCE), 1,4- dichlorobenzene, chlorure de méthylène <u>Alcools :</u> isopropanol, menthol, 2-éthylhexanol, Ethanol	28 études (1997-2021, 1136 Vols) dont 11 études sur des vols non-fumeurs (1997 – 2021, 551 Vols)	0 à 384 µg.m ⁻³ (acétone) Moyennes : 1 – 14 µg.m ⁻³ 0 à 1048 µg.m ⁻³ (limonène) Moyenne : 0,5 à 24 µg.m ⁻³ 0 à 304 µg.m ⁻³ (PCE) Moyennes 0,4 à 7,3 µg.m ⁻³ 0 à 5453 µg.m ⁻³ (éthanol) Moyennes : 10 à 386 µg.m ⁻³
Organophosphorés	10 études (1998-2019, 424 vols) rapportées par Hayes et al 2021	
<u>TCP</u>	8 études, 400 vols	0 à 51,3 µg.m ⁻³ Moyennes nd à 2,9 µg.m ⁻³
Polybromés (Retardateurs de flamme)	1 étude – 59 vols (Allen et al, 2013) (2 études ont également recherché des retardateurs de flamme dans les poussières sédimentées)	Taux de détection plus élevés pour la plupart des congénères du polybromodiphényléthers (PBDE). Médiane : <0.4 ng/m ³ à 1,3 ng/m ³ Max : 9,4 à 2100 ng/m ³
Particules / particules ultrafines	17 études (1992 - 2019, 451 vols) rapportées par Hayes et al. 2021 Michaelis et al., 2021 Yu et al. (2021)	Concentration maximale en nombre : 3.10 ⁵ concentration maximale massique : 7 à 17 µg.m ⁻³
carbone suie	3 études (2017 - 2019, 52 vols) (Kim et al. (2019) Targino et al. 2017. Anh Le et al. (2019))	Concentrations plus élevées lors des phases d'embarquement et débarquement ((moyenne de 3,78 µg. ⁻³). En vol, concentrations moyennes de l'ordre de 0,2 µg. ⁻³

**Etat des connaissances sur les effets sur la santé
liés à la profession de personnels navigants et sur la
qualité de l'air dans les cabines d'avion**

Saisine « n° 2019-SA-0075 – Avions »

**RAPPORT
d'expertise collective**

**« Comité d'experts spécialisé –
Evaluation des risques liés aux milieux aériens »**

« Groupe de travail – Qualité de l'air dans les avions »

Juillet 2023

Citation suggérée

Anses. (2023). Etat des connaissances sur les effets sur la santé liés à la profession de personnels navigants et sur la qualité de l'air dans les cabines d'avion. (saisine 2019-SA-0075). Maisons-Alfort : Anses, 357 p.

Mots clés

avion, cabine, personnel navigant, hôtesse de l'air, pilote d'avion, steward, effets sur la santé, qualité de l'air, syndrome aérotoxique, évènement feux fumée,

airplane, aircraft, cabin, aircrew, flight attendant, aircraft pilot, steward, health effects, air quality, aerotoxic syndrome, fume event

Présentation des intervenants

PRÉAMBULE : Les experts membres de comités d'experts spécialisés, de groupes de travail ou désignés rapporteurs sont tous nommés à titre personnel, *intuitu personae*, et ne représentent pas leur organisme d'appartenance.

GROUPE DE TRAVAIL

Président

M. François GAIE-LEVREL – Ingénieur chercheur (Laboratoire national de métrologie et d'essais) – Spécialités : métrologie, pollution atmosphérique, aérosols, nanoparticules.

Membres

M. Yann BARGUIL – Praticien hospitalier, Habilitation à diriger des recherches (HDR) (Centre Hospitalier Territorial de Nouvelle-Calédonie, Université de la Nouvelle-Calédonie) – Spécialités : Biologie médicale, Biochimie, Toxicologie.

M. Bruno CHENUÉL – Professeur des universités, praticien hospitalier (Université de Lorraine / Centre Hospitalier Régional Universitaire de Nancy) – Spécialités : Pneumologie, Physiologie. Responsable de la Capacité de Médecine Aérospatiale de Nancy.

M. Jean-Dominique DEWITTE - Professeur émérite des universités (Université de Bretagne Occidentale - Brest) – Spécialités : pathologies professionnelles, pneumologie, allergologie, tabacologie.

Mme Danièle JARGOT - Ingénieur chimiste, responsable d'études (Institut National de Recherche sur la Sécurité) – Spécialités : qualité de l'air, métrologie, agents chimiques et biologiques.

M. Jaouad IRAM – Médecin (Ministère de la Santé - Direction régionale de sante - Marrakech MAROC) – Spécialités : médecine aérospatiale et d'urgence, risque au travail (démission le 29 juin 2022).

M. Olivier JOUBERT – Maître de conférences des Universités (Université de Lorraine) – Spécialités : toxicologie, sécurité sanitaire, particules.

M. Florian NACHON - Ingénieur Civil de la défense hors classe, HDR (Service de santé des armées) – Spécialités : Biochimie, Toxicologie des neurotoxiques.

Mme Ndeye Coumba NDIAYE - Maître de conférence des Universités (Université de Lorraine - Faculté de Pharmacie de Nancy) – Spécialités : épidémiologie et santé publique.

RAPPORTEURS

Pour la partie relative au syndrome aérotoxique

Mme Rachel NADIF – Responsable d'équipe, chargée de recherche (Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale, CESP U1018) – Spécialités : épidémiologie, santé respiratoire.

M. Hervé LABORDE-CASTEROT - Praticien hospitalier (Centre antipoison de Paris, AP-HP Nord Université Paris Cité) – Spécialités : pathologies professionnelles, toxicologie clinique, épidémiologie, allergologie

Pour l'extraction des données du Réseau national de vigilance et de prévention des pathologies professionnelles (RNV3P)

M. Jean-Claude PAIRON - centre de consultations de pathologies professionnelles et environnementales (CCPPE CHI Créteil)

Pour l'extraction des données des Centres anti-poisons (CAP)

M. Hervé LABORDE-CASTEROT - Praticien hospitalier (Centre antipoison de Paris, AP-HP Nord Université Paris Cité) – Spécialités : pathologies professionnelles, toxicologie clinique, épidémiologie, allergologie

Mme Magali OLIVA-LABARDIE - Médecin urgentiste (Centre antipoison de Bordeaux - CHU de Bordeaux)

COMITÉ D'EXPERTS SPÉCIALISÉ

Les travaux, objets du présent rapport ont été suivis et adoptés par le CES suivant :

- Evaluation des risques liés aux milieux aériens (2021-2024) – 11 juin 2021, 23 juin et 3 octobre 2022, 20 janvier, 3 avril, 15 mai, 16 juin et 3 juillet 2023

Présidente

Mme Rachel NADIF – Responsable d'équipe, chargée de recherche, (Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale, CESP U1018) – Spécialités : épidémiologie, santé respiratoire.

Vice-président

M. Hervé LABORDE-CASTEROT - Praticien hospitalier (Centre antipoison de Paris, AP-HP Nord Université Paris Cité) – Spécialités : pathologies professionnelles, toxicologie clinique, épidémiologie, allergologie.

Membres

Mme Sophie ACHARD – Maître de conférences des universités (Faculté de Santé - Pharmacie - Université Paris Cité) – Spécialité : toxicologie environnementale.

M. Fabrice ALLIOT – Ingénieur d'études (Ecole Pratique des Hautes Etudes) – Spécialités : métrologie et méthode d'analyse des polluants de l'air, perturbateurs endocriniens.

M. Michel ANDRÉ – Directeur de recherche (Université Gustave Eiffel) – Spécialités : transports et pollution de l'air, métrologie et modélisation des émissions des véhicules et du trafic, méthodologies d'évaluation.

Mme Nathalie BONVALLOT – Enseignante chercheuse (Ecole des Hautes Etudes en Santé Publique, Université de Rennes – Institut de recherche sur la santé, l'environnement et le travail, UMR Inserm 1085) – Spécialités : toxicologie, évaluation des risques sanitaires, identification des mélanges et modèles de risques associés, perturbateurs endocriniens.

M. Patrick BROCHARD – Professeur émérite des universités (Université de Bordeaux) – Spécialités : pneumologie, pathologies professionnelles et environnementales, impact sanitaire des particules inhalées (amiante, silice...).

Mme Fleur DELVA – Praticien hospitalier, médecin de santé publique (Centre Hospitalier Universitaire de Bordeaux) – Spécialités : médecine, prévention, reproduction, épidémiologie.

M. Jean-Dominique DEWITTE - Professeur émérite des universités (Université de Bretagne Occidentale - Brest) – Spécialités : pathologies professionnelles, pneumologie, allergologie, tabacologie.

M. Marc DURIF – Directeur exécutif (Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air) – Spécialités : métrologie et méthode d'analyse des polluants de l'air, émissions industrielles et anthropiques, caractérisation des expositions, construction de stratégies de surveillances dans l'air dans différents contextes.

Mme Emilie FREALLE – Praticien hospitalier (Centre Hospitalier Régional Universitaire de Lille, Université de Lille) – Spécialités : écologie microbienne de l'air, microbiologie analytique, évaluation et prévention du risque microbiologique, surveillance de l'environnement intérieur.

François GAIE-LEVREL – Ingénieur chercheur (Laboratoire national de métrologie et d'essais) – Spécialités : métrologie, pollution atmosphérique, aérosols, nanoparticules.

M. Philippe GLORENNEC - Enseignant chercheur (Ecole des Hautes Etudes en Santé Publique, Université de Rennes - Institut de recherche sur la santé, l'environnement et le travail, UMR Inserm 1085) - Spécialité : évaluation des expositions et des risques sanitaires d'origine chimique.

Mme Marianne GUILLEMOT – Responsable d'études (Institut National de Recherche et de Sécurité) – Spécialités : métrologie, surveillance atmosphérique et des environnements professionnels.

Mme Marion HULIN - Chargée de projet et d'expertise scientifique (Santé Publique France) – Spécialités : épidémiologie, qualité de l'air intérieur, santé environnement, évaluation des expositions.

Mme Bénédicte JACQUEMIN – Chargée de recherche (Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale) – Spécialités : épidémiologie environnementale, pollution atmosphérique.

M. Olivier JOUBERT – Maître de conférences (Université de Lorraine) – Spécialités : toxicologie, sécurité sanitaire, particules.

Mme Juliette LARBRE - Directrice du Laboratoire Polluants Chimiques (Service Parisien de Santé Environnementale) – Spécialités : qualité de l'air intérieur et extérieur, métrologie, santé environnement.

Mme Barbara LE BOT – Professeur des Universités (Ecole des hautes études en santé publique, Université de Rennes, Institut de recherche sur la santé, l'environnement et le travail, UMR Inserm 1085) – Spécialités : évaluation des expositions, santé publique, métrologie et méthode d'analyse des polluants de l'air et poussières.

Mme Johanna LEPEULE – Chargée de recherche (Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale) – Spécialités : pollution de l'air, épidémiologie environnementale, santé périnatale, grossesse, épigénétique, modélisation des expositions.

Mme Danièle LUCE – Directrice de recherche (Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale) – Spécialités : épidémiologie, santé travail, expositions professionnelle et environnementale.

Mme Corinne MANDIN – Responsable du laboratoire d'épidémiologie (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire) – Spécialités : évaluation des expositions aux substances chimiques et agents physiques et des risques sanitaires associés.

Mme Anne OPPLIGER – Responsable de recherche (Unisanté : Centre universitaire de médecine générale et santé publique de Lausanne) – Spécialités : santé travail, risques biologiques, bioaérosols, agents zoonotiques.

M. Pierre PERNOT – Directeur Opérationnel (Airparif) – Spécialités : métrologie, surveillance et réglementation de la qualité de l'air.

M. Nhan PHAM-THI – Enseignant chercheur, médecin (Institut de Recherche Biomédicale des Armées, Ecole Polytechnique) – Spécialités : allergologie, pneumologie.

M. Jean-Marc THIBAUDIER – Médecin du travail (Retraité - Mutualité Sociale Agricole des Alpes du Nord) – Spécialités : santé travail, médecine, agriculture, produits phytosanitaires, poussières agricoles. (Démission le 23 février 2023)

- Evaluation des risques liés aux milieux aériens (2017-2021) : 07 novembre 2019 et 6 février 2020

Présidente

Mme Rachel Nadif – Chargée de recherche (Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale – Responsable Equipe, CESP U1018) – Spécialité : épidémiologie, santé respiratoire.

Vice-président

M. Christophe PARIS – Professeur des universités, praticien hospitalier (Université de Rennes 1 - Inserm U1085 IRSET – Centre hospitalier universitaire de Rennes). Spécialités : épidémiologie des risques professionnels, pathologies professionnelles, santé au travail.

Membres

Mme Sophie ACHARD – Enseignant chercheur, maître de conférences (Université Paris Descartes) – Spécialité : toxicologie environnementale.

Mme Christina ASCHAN-LEYGONIE – Enseignant-chercheur (Université Lumière Lyon 2 - UMR 5600 Environnement Ville Société - EVS) - Spécialités : géographie, milieux urbains, inégalités de santé.

M. Denis BEMER – Responsable d'études (Institut national de recherche et de sécurité) – Spécialités : physique et métrologie des aérosols - filtration de l'air. (Démission le 3 juillet 2020)

Mme Valérie BEX – Responsable de la cellule santé habitat (Service parisien de santé environnementale) – Spécialités : métrologie des polluants biologiques, qualité de l'air intérieur.

Mme Nathalie BONVALLOT – Enseignant chercheur (Ecole des hautes études en santé publique) – Spécialités : toxicologie, évaluation des risques sanitaires.

M. Denis CAILLAUD – Professeur des universités, praticien hospitalier (CHU de Clermont-Ferrand) – Spécialités : pneumologie, allergologie, épidémiologie-environnement (pollens, moisissures).

M. Jean-Dominique DEWITTE - Professeur des universités, praticien hospitalier (Université de Brest) – Spécialités : santé travail, pneumologie.

M. Marc DURIF – Responsable de Pôle (Institut national de l'environnement industriel et des risques) – Spécialités : métrologie et méthode d'analyse des polluants de l'air, caractérisation des expositions.

Mme Emilie FREALLE – Praticien Hospitalier (Centre Hospitalier Régional Universitaire de Lille, Institut Pasteur de Lille) – Spécialités : écologie microbienne de l'air, microbiologie analytique, évaluation et prévention du risque microbiologique, surveillance de l'environnement intérieur.

M. Philippe GLORENNEC – Enseignant chercheur (Ecole des hautes études en santé publique – Institut de recherche sur la santé, l'environnement et le travail, UMR Inserm 1085) – Spécialités : évaluation des expositions et des risques sanitaires d'origine chimique.

Mme Ghislaine GOUPIL – Chef de département, adjoint au chef du pôle environnement (Laboratoire Central de la Préfecture de Police) – Spécialités : métrologie des polluants (air intérieur, air ambiant et air des lieux de travail), techniques d'analyses, réglementation air.

Mme Marianne GUILLEMOT – Responsable d'études (Institut national de recherche et de sécurité) – Spécialités : métrologie, surveillance atmosphérique et des environnements professionnels.

Mme Bénédicte JACQUEMIN – Chargée de recherche (INSERM) – Spécialités : épidémiologie environnementale, pollution atmosphérique.

M. Olivier JOUBERT – Maître de conférences (Université de Lorraine) – Spécialités : toxicologie, sécurité sanitaire.

Mme Danièle LUCE – Directrice de recherche (Institut national de la santé et de la recherche médicale) – Spécialités : Epidémiologie, santé travail.

Mme Corinne MANDIN – Chef de division (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) – Spécialités : évaluation des expositions et des risques sanitaires, environnements intérieurs.

M. Fabien MERCIER – Ingénieur de recherche, Responsable R&D (Ecole des hautes études en santé publique / Laboratoire d'étude et de recherche en environnement et santé) – Spécialités : métrologie des polluants, méthodes d'analyse, air intérieur.

Mme Christelle MONTEIL – Enseignant-chercheur (Université de Rouen Normandie) – Spécialité : toxicologie.

Mme Anne OPPLIGER – Privat-Docent & Maître d'Enseignement et de Recherche (Institut universitaire romand de Santé au Travail, Lausanne) – Spécialités : Santé travail, risques biologiques, bioaérosols, agents zoonotiques.

M. Pierre PERNOT – Responsable de service (Airparif) – Spécialités : surveillance et réglementation de la qualité de l'air.

PARTICIPATION ANSES

Coordination scientifique et contribution scientifique

Mme Audrey MALRAT-DOMENGE – Coordinatrice d'expertise, Unité d'Évaluation des Risques liés à l'Air (UERA) – Anses

Mme Amandine PAILLAT – Adjointe à la cheffe d'unité, Unité d'Évaluation des Risques liés à l'Air (UERA) – Anses

Contribution scientifique

Mme Marion KEIRSBULCK – Cheffe d'unité, Unité d'Évaluation des Risques liés à l'Air (UERA) – Anses

Mme Eva OUGIER – chargée d'études - Direction d'alerte et des vigilances sanitaires – Anses

Mme Alexandra PAPADOPOULOS – Coordinatrice d'expertise, Unité d'Évaluation des Risques liés à l'Air (UERA) – Anses

Mme Cécilia SOLAL – chargée d'études en toxicovigilance - Direction d'alerte et des vigilances sanitaires – Anses

Secrétariat administratif

Mme Sophia SADDOKI – Anses

AUDITION DE PERSONNALITÉS EXTÉRIEURES

Hamburg University of Applied Sciences (HAW Hamburg), Germany, Department of Automotive and Aeronautical Engineering, Aircraft Design and Systems Group (AERO) unit - 8 juillet 2021

Docteur Dieter SCHOLZ, ingénieur-chercheur en aéronautique

Direction de la sécurité de l'aviation civile (DSAC), Organisme pour la Sécurité de l'Aviation Civile (OSAC) - 14 janvier 2022

M. Patrick CABANES – ingénieur de suivi de navigabilité (OSAC)

M. Arnaud CALONNEC - chef du pôle entretien (OSAC)

M. Stéphane CORCOS - chef de la mission évaluation et amélioration de la sécurité (DSAC)

M. Dominique DUMORTIER : responsable de la section DMCP (département certification produits – OSAC)

M. René GERMA - chef du pôle médical (DSAC)

Air France, service médical - 10 mai 2022

Dr. Michel KLERLEIN – médecin coordinateur

Dr Marie-Christine BOUTON : médecin du travail

Air France, service de maintenance - 24 juin 2022

M. Patrick GROSEILLE - responsable engineering et flotte à la direction de la maintenance

Aéroport de Paris-Charles de Gaulle (ADP), service médical d'urgence - 10 juin 2022

Dr. Patrick THOMAS - chef du service médical

Corsair - 12 septembre 2022

M. Xavier DEBUGNY : coordinateur support technique

Mme Corinne DE QUERO : élue au CSE (comité social et économique) et secrétaire de la CSSCT – personnel navigant (commissions santé, sécurité et conditions de travail)

M. Stéphane MEGE - Coordinateur support technique

M Yann REBER, directeur technique

Association des victimes du syndrome aérotoxique (AVSA) - 13 septembre 2022

M. Stéphane PASQUALINI - président

M. Francis ENTEMEYER - membre

SOMMAIRE

Présentation des intervenants	3
SOMMAIRE	10
Sigles et abréviations.....	13
Liste des tableaux	18
Liste des figures.....	20
1 Contexte, objet et modalités de réalisation de l'expertise.....	22
1.1 Contexte	22
1.2 Objet de la saisine	22
1.3 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation.....	23
1.4 Prévention des risques de conflits d'intérêts	24
2 Méthode d'expertise	25
2.1 Axes de travail	25
2.2 Revue de la littérature et littérature grise	26
2.3 Données des réseaux de vigilance et de sinistralités	28
2.3.1 Données du RNV3P	28
2.3.2 Système d'information des Centres antipoison (SICAP)	31
2.4 Auditions de parties prenantes.....	32
2.4.1 Contexte réglementaire.....	32
2.4.2 Fonctionnement et entretien du système de conditionnement de l'air de la cabine	32
2.4.3 Santé des personnels navigants et « Syndrome aérotoxique »	33
2.5 Consultation internationale	33
2.6 Projets de recherche.....	34
2.6.1 CAQ I et CAQ II (EASA 2017b)	37
2.6.2 AVOIL (EASA 2017a).....	37
2.6.3 FACTS (European Commission 2020a)	38
3 Description de la population de personnels navigants en France.....	43
3.1 Définition des personnels navigants	43
3.2 Caractéristiques de la population des personnels navigants.....	44
3.3 Facteurs environnementaux et conditions de travail	47
3.4 Aptitude aéromédicale des personnels navigants	49
3.5 Données issues des réseaux de vigilance	51
3.5.1 RNV3P	51
3.5.2 CAP	54
4 Etat des connaissances des effets sanitaires liés à la profession de personnel navigant	57

4.1	Objectif	57
4.2	Méthode	57
4.3	Synthèse des données chez l'humain	62
4.3.1	Cancers	63
4.3.2	Santé cardiovasculaire	80
4.3.3	Santé respiratoire	82
4.3.4	Reproduction féminine	83
4.3.5	Troubles musculo-squelettiques	85
4.3.6	Troubles psychosociaux.....	88
4.3.7	Mortalité et morbidité toute cause.....	89
4.3.8	Limites	89
4.3.9	Conclusions.....	90
4.4	Syndrome aérotoxique.....	94
4.4.1	Origine du "Syndrome Aérotoxique"	94
4.4.2	Symptômes du « syndrome aérotoxique »	97
4.4.3	Hypothèses sur les polluants pouvant être à l'origine des symptômes ressentis.....	99
4.4.4	Etudes de cas	102
4.4.5	Biomarqueurs.....	104
4.4.6	Conclusion.....	108
5	État des connaissances sur les polluants chimiques et composés particuliers dans l'air des cabines d'avions	110
5.1	Objectif	110
5.2	Méthodologie	110
5.3	Lignes directrices et paramètres généraux de la qualité de l'air dans les cabines.....	113
5.4	Sources de pollution de l'air en cabine ou cockpit.....	115
5.4.1	Fonctionnement de la ventilation de la cabine et du cockpit d'un avion	116
5.4.2	Sources potentielles.....	119
5.4.3	Terminologie relative aux « fume events »	122
5.4.4	Fréquence des évènements CAC.....	124
5.4.5	Identification des sources de composés gazeux et particuliers.....	124
5.5	Résultats de mesures en conditions réelles de composés gazeux et particuliers et de paramètres environnementaux	133
5.5.1	Contaminants mesurés et gammes de concentrations.....	133
5.5.2	CO ₂ et renouvellement d'air	150
5.5.3	Mesures réalisées lors de fume events rapportés	151
5.5.4	Polluants mesurés sur les filtres HEPA et dans les conduits de ventilation	151
5.6	Conclusion.....	153

6	Etat des lieux des recommandations institutionnelles existantes sur les moyens d'action ou de prévention.....	158
6.1	Méthodologie	158
6.2	Prévention : maintenance, formation/sensibilisation/information	158
6.3	Gestion en vol, procédures	161
6.4	Gestion Post évènement.....	162
6.5	Retours des opérateurs	164
6.5.1	Interventions sur les avions.....	165
6.5.2	Actions vis-à-vis des personnels navigants	167
7	Conclusions du groupe de travail	168
8	Recommandations du groupe de travail	170
9	Bibliographie.....	172
Annexe 1.	Lettre de saisine.....	187
Annexe 2.	Grille AMSTAR 2.....	190
Annexe 3.	Grille de lecture des articles princeps.....	203
Annexe 4.	Recherche de la littérature grise.....	206
Annexe 5.	Comptes rendus des auditions	209
Annexe 6.	Consultation internationale : organismes	254
Annexe 7.	Consultation internationale : questionnaire.....	255
Annexe 8.	Eléments issus du projet FACTS	257
Annexe 9.	Rapport du Réseau national de vigilance des pathologies professionnelles.....	260
Annexe 10.	Rapport d'étude des cas de toxicovigilance	291
Annexe 11.	Requêtes bibliographiques relatives à la partie Effets sur la santé liés à la profession de personnels navigants.....	314
Annexe 12.	Tableaux de synthèse des données épidémiologiques	326
Annexe 13.	Biomarqueurs de lésion neuronale ou cérébrale.....	337
Annexe 14.	Requêtes bibliographiques relatives à la partie pollution de l'air des cabines	339
Annexe 15.	Revue de synthèse : pollution de l'air des cabines d'avions.....	341
Annexe 16.	Données détaillées COV (R. Chen, Fang, <i>et al.</i> 2021)	344
Annexe 17.	Détails des données pour les OP et RDF	350

Sigles et abréviations

AChE : acétylcholinestérase

ALPA : *Air Line Pilots Association International*

Anses : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

APU : Groupe auxiliaire de puissance (Auxiliary Power Unit)

ASHRAE : *American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers*

AVSA : Association des victimes du syndrome aérotoxique

BACS : *Bleed Air Contamination Simulator*

BC : carbone suie (*Black carbon*)

BChE : Butyrylcholinestérase

BNCM : Base nationale des cas médicaux

BNPC : Base nationale des produits et compositions

CAA : *Civil Aviation Authority*

CAC : contamination de l'air de cabine

CACE : *Cabin/Cockpit Air Contamination Event*

CAP : Centre anti-poison

CBC : carcinomes basocellulaires

CBDP : Phosphate d'ortho-Crésylsaligénine

CCMSA : Caisse centrale de la Mutualité Sociale Agricole

CCPPE : Centres de consultations de pathologies professionnelles et environnementales

CDCP : *Centers for Disease Control and Prevention*

CEM : champs électromagnétiques

CEN : Centre européen de normalisation

CES : Comité d'experts spécialisé

CFDT : Confédération française démocratique du travail

CIM : Classification Internationale des Maladies

CIRC : Centre international de recherche sur le cancer (en anglais *IARC International Agency for Research on Cancer*)

CITP : Classification Internationale Type des Professions

CMA : Concentration moyenne alvéolaire

CNAM : Caisse nationale d'Assurance maladie des travailleurs salariés et indépendants

CO₂ : Dioxyde de carbone

CO : monoxyde de carbone

COV : Composés organiques volatils

COSV : Composés organiques semi- volatils

COVT : Composés organiques volatils totaux

CPAM : Caisse primaire d'assurance maladie

CRPN : Caisse de retraite complémentaire des personnels navigants

DBPP : Phosphate de dibutylphényle

DDT : dichloro-diphényle-trichloro-éthane

DGAC : Direction Générale de l'Aviation Civile

DSAC : Direction de la sécurité de l'Aviation civile

EASA : Agence européenne de la sécurité aérienne

ECS : système de contrôle environnemental

EFF : Evènement feux/fumées

EQRS : Evaluation quantitative des risques pour la santé

ERR : Excès de risque relatif

ETP : Equivalents temps plein

FAA : *Federal Aviation Administration*

FAHS : *Flight Attendant Health Study*

FFO : Feux, fumées, odeurs

FTS : fumées de tabac secondaires

GC-MS : *Gas-chromatography - mass spectrometry*

GFAP : *glial fibrillary acidic protein*

GT : Groupe de travail

HAP : hydrocarbures aromatiques polycycliques

HBCD : hexabromocyclododécane

HEPA : *High Efficiency Particulate Air*

IATA : Association internationale du transport aérien

IC : Intervalle de confiance

ICP-MS : *Inductively coupled plasma - mass spectrometry*

IgG : immunoglobuline G

INRS : Institut National de Recherche et de Sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles

IRSN : Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire

LASEM : Laboratoire d'analyse, de surveillance et d'expertise de la Marine

LEPID : Laboratoire d'épidémiologie des rayonnements ionisants

LNH : Lymphome non hodgkinien

6-MHO : 6-méthylhepténone

NAF : Nomenclature d'activité française

NHANES : *National Health and Nutrition Survey*

NO : monoxyde d'azote

NO₂ : dioxyde d'azote

NOx : Oxydes d'azote

NRC : *National Research Council*

NTE : *neuropathy target esterase*

O3 : Ozone

OACI : Organisation de l'aviation civile internationale

OHRCA : consortium de recherche en santé au travail dans l'aviation

OMS : Organisation mondiale de la santé (en anglais *WHO World health organization*)

OP : composés organophosphorés

OPICN : neuropathie chronique induite par les organophosphorés

OPIDN : neuropathie retardée induite par les organophosphorés

OR : *Odds ratio*

ORL : oto-rhino-laryngée

PBDE : polybromodiphényléthers

PCB : polychlorobiphényles

PCE : perchloroéthylène

PECO : Population exposition comparateur outcome

PM : *Particulate matter* (en français matière particulaire)

PN : Personnel navigant

PN ER : Personnel navigant des essais et réception

PN TA : Personnel navigant du travail aérien

PNC : Personnel navigant commercial

PNREST : programme national de recherche « Environnement-santé-travail »

PNT : Personnel navigant technique

PRE : Pathologie en relation avec l'environnement

PRT : Pathologie en relation avec le travail

PS : Problème de santé

PSS : *Poisoning Severity Score*

PUF : Particules ultrafines

RIVM : *Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu* (Institut national de la santé publique et de l'environnement)

RNV3P : Réseau national de vigilance et de prévention des pathologies professionnelles

RR : Risque relatif

RRc : Risque relatif combiné

RTU : Réponse téléphonique à l'urgence

SAC : Service des agents et compositions

SCM : Service des cas médicaux

SFST : Société française de santé au travail

SGT : Evaluation de la gravité en toxicovigilance

SICAP : Système d'information des Centres antipoison

SIR : Taux d'incidence standardisé (*Standardized Incidence Ratio*)

SMR : taux standardisé de mortalité (*Standardized Mortality Ratio*)

SNPL : Syndicat national des pilotes de ligne

SNPNC-FO : Syndicat national du personnel navigant

SO₂ : Dioxyde de soufre

SPF : Santé publique France

SPL : Syndicat des pilotes de ligne

SPR : Ratio de prévalence standardisé

SSE : Statut socio-économique

TBP : Phosphate de tributyle

TiBP : Phosphate de triisobutyle

TnBP : Phosphate de tri-n-butyle

TBPH : bis-(2-éthylhexyl)-tétrabromo-phthalate

TCE : Trichloroéthylène

TCP : Phosphate de tricrésyle

T CPP : tris(chloro-isopropyl) phosphate

TDCPP : tris(1,3-dichloro-isopropyl)phosphate

TEA : techniciens d'entretien des aéronefs

TEP : Thésaurus des expositions professionnelles

TMPP : Phosphate de triméthylolpropane

TMS : Trouble musculosquelettique

TNO : *Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek*

ToCP : isomère ortho de phosphate de tricrésyle

TPP : Triphényl phosphate

TPS : Troubles psycho-sociaux

TXP : Phosphate de trixylyle

USA : Etats-Unis

UV : Ultra-violet

VLEP : Valeur limite d'exposition professionnelle

WP : *Work package*

Liste des tableaux

Tableau 1 : Résumé des questions traitées et de la méthode d'expertise associée pour y répondre.....	25
Tableau 2 : Etapes de la revue de la littérature	26
Tableau 3 : Critères PECO pour la formulation des questions de recherche	27
Tableau 4 : Durée maximale du temps de vol effectué du personnel navigant	49
Tableau 5 : Durées minimales des temps d'arrêt périodiques des personnels navigants.....	49
Tableau 6 : Périodicité du certificat médical d'aptitude Commission Européenne 2011	50
Tableau 7 : Structure PECO pour la requête bibliographique sur la santé des personnels navigants.....	57
Tableau 8 : Critères d'exclusion pour la sélection des données de santé des personnels navigants hors syndrome aérotoxique	59
Tableau 9 : Critères d'exclusion pour la sélection des données de santé des personnels navigants -syndrome aérotoxique.....	59
Tableau 10 : Synthèse des résultats de la revue de la littérature (jusqu'au 1 ^{er} juin 2023) et des monographies du CIRC (83, 2004 ; 100D & E, 2012 et 124, 2020) pour les maladies cancéreuses.....	91
Tableau 11 : Synthèse des résultats d'après les résultats de la revue de la littérature pour les maladies non cancéreuses.....	92
Tableau 12 : Symptômes aigus rapportés après une exposition à du bleed air contaminé (traduit de OHRCA 2014)	98
Tableau 13 : Symptômes chroniques rapportés après une exposition à du bleed air contaminé (traduit de OHRCA 2014)	98
Tableau 14 : Lignes directrices pour différents paramètres de la qualité de l'air en cabine/cockpit d'avion	114
Tableau 15 : Sources potentielles de contamination de l'air des cabines (source EASA 2017b, CEN 2022)	119
Tableau 16 : FACTS - Résultats de la phase test 2	128
Tableau 17 : Panorama des données relatives aux contaminants chimiques et particuliers mesurés dans l'air des cabines d'avion	134
Tableau 18 : Caractéristiques des mesures de COV	136
Tableau 19 : synthèse des concentrations en COV mesurées dans l'air des cabines.....	138
Tableau 20 : Synthèse des mesures de concentration en nombre de particules.....	140
Tableau 21 : synthèse des concentrations massiques en particules.....	142
Tableau 22 : mesures de distributions granulométriques en nombre	144
Tableau 23 : Spécificité de l'exposition des personnels navigants (D'après)	257
Tableau 24 - Données démographiques des patients.....	275
Tableau 25 - Description des postes de travail et des secteurs d'activité (Source : données RNV3P – 2001 à 2021)	275

Tableau 26 - Répartition des PRT par catégorie de pathologies selon la pathologie principale codée	276
Tableau 27 - Pathologies principales en relation avec le travail selon le regroupement par catégorie de pathologie	276
Tableau 28 - Description des PRT selon la catégorie d'âge à la consultation, le poste de travail responsable et l'origine de la demande de consultation.....	278
Tableau 29 - Expositions de niveau d'imputabilité au moins faible en lien avec les psychopathologies.....	280
Tableau 30 - Expositions d'imputabilité au moins faible en lien avec les cancers	281
Tableau 31 - Expositions d'imputabilité au moins faible en lien avec des troubles du sommeil	281
Tableau 32 - Expositions d'imputabilité au moins faible en lien avec des intoxications à des substances.....	282
Tableau 33 - Expositions d'imputabilité au moins faible en lien avec des troubles musculo-squelettiques.....	282
Tableau 34 - Expositions d'imputabilité au moins faible en lien avec des troubles de l'audition	282
Tableau 35 - Caractéristiques démographiques des patients	284
Tableau 36 - Postes de travail, secteurs d'activité et origine de la demande de consultation	285
Tableau 37 - Description des pathologies principales évoquant des manifestations cliniques possiblement en lien avec des expositions dans l'air pressurisé de cabine d'avion d'imputabilité de niveau au minimum faible.....	286
Tableau 38 - Expositions associées à un niveau d'imputabilité au moins faible des PRT mentionnant des manifestations cliniques possiblement liées à une/des exposition(s) dans l'air intérieur d'une cabine d'avion (plusieurs expositions possibles en relation avec une PRT) 286	286
Tableau 39 - Pathologies principales codées pour 5 problèmes de santé conclus en ni PRT ni PRE évoquant des expositions dans l'air de cabine d'avion rapportées par le patient, associées à un niveau d'imputabilité nulle (plusieurs expositions possibles en relation avec une PRT)	288
Tableau 40 : Synthèse des données épidémiologiques sur les cancers cutanés	326
Tableau 41 : Synthèse des données épidémiologiques sur les maladies cardiovasculaires	329
Tableau 42 : Synthèse des données épidémiologiques sur les effets sur la reproduction féminine	332
Tableau 43 : Synthèse des données épidémiologiques sur les troubles psychosociaux	333
Tableau 44 : Synthèse des données épidémiologiques sur les TMS	335

Liste des figures

Figure 1 : Évolution du nombre d'actifs par secteur d'activité de 2016 à 2020	45
Figure 2 : Évolution du nombre d'équivalents temps plein (ETP) par secteur d'activité de 2016 à 2020	46
Figure 3 : Part des hommes et des femmes en fonction du secteur d'activité en 2020	46
Figure 4 : Age moyen des hommes et des femmes en fonction des secteurs d'activité en 2020	47
Figure 5 : Facteurs et condition de travail des personnels navigants en vol (d'après European Commission 2020b)	48
Figure 6 : Démarche d'identification des pathologies en relation avec le travail (PRT) concernant le personnel navigant du secteur aérien.....	53
Figure 7 : Requêtes pour l'identification des données sur les effets sur la santé chez le personnel navigant	58
Figure 8 : Diagramme Prisma – Etat des connaissances des effets sanitaires liés à la profession de personnel navigant.....	62
Figure 9 : représentation schématique des requêtes bibliographiques réalisées pour l'état des connaissances sur la qualité de l'air	111
Figure 10 : diagramme Prisma	113
Figure 11 : ECS avec <i>bleed air</i> (source CEN 2022).....	118
Figure 12 : ECS sans <i>bleed air</i> (source CEN 2022).....	118
Figure 13 : schéma illustratif des sources potentielles de pollution de l'air des cabines/cockpit d'avions.....	119
Figure 14 : Synthèse des données de concentration en CO2 mesurées dans l'air de cabine d'avions issues de 19 études (source : R. Chen, Fang, <i>et al.</i> 2021).	150
Figure 15 - Démarche d'identification des pathologies en relation avec le travail (PRT) concernant le personnel navigant du secteur aérien.....	272
Figure 16 - Nombre annuel de PRT enregistrées concernant du personnel navigant du transport aérien de 2001 à 2021.....	274
Figure 17 - Nombre annuel de PRT évoquant des manifestations cliniques possiblement en lien avec des expositions dans l'air pressurisé de cabine d'avion diagnostiquées de 2001 à 2021	284
Figure 18 : Origine cellulaire de biomarqueurs associés au traumatisme crânien (source : In : Harel Adrian, Kvist Mårten, Nuutinen Salla, and Välimaa Lasse. Biomarkers of Traumatic Brain Injury: Temporal Changes in Body Fluids.)	337
Figure 19 : . Biomarqueurs spécifiques au type de cellule impliqué dans la survenue de troubles cérébraux (source : Reddy DS, Abeygunaratne HN. Experimental and Clinical Biomarkers for Progressive Evaluation of Neuropathology and Therapeutic Interventions for Acute and Chronic Neurological Disorders. Int J Mol Sci. 2022 Oct 3;23(19):11734. doi: 10.3390/ijms231911734.)	337
Figure 20 : Genèse des auto-anticorps en tant que biomarqueurs potentiels. (Source : Kobeissy F, Moshourab RA. Autoantibodies in CNS Trauma and Neuropsychiatric Disorders: A New Generation of Biomarkers. In: Kobeissy FH, editor. Brain Neurotrauma: Molecular,	

Neuropsychological, and Rehabilitation Aspects. Boca Raton (FL): CRC Press/Taylor & Francis; 2015. Chapter 29.....338

1 Contexte, objet et modalités de réalisation de l'expertise

1.1 Contexte

Depuis plusieurs années, des personnels navigants rapportent des effets sur la santé qu'ils associent à des expositions à des odeurs inhabituelles / émanations ou des fumées dans les cabines ou cockpit d'avions. Ces effets, très variés et aspécifiques, ont été mentionnés dans plusieurs études et regroupés par certains auteurs sous le terme « syndrome aérotoxique ». Ils ont pu conduire, pour certains travailleurs, à la perte de leur aptitude médicale.

Dans la grande majorité des avions, l'air alimentant la cabine étant en partie prélevé au niveau des compresseurs des moteurs, ces odeurs inhabituelles ou fumées sont couramment attribuées à une potentielle contamination de l'air des cabines par des composés issus de l'huile moteur ou de sa dégradation thermique, désignée dans la littérature par l'expression « *fume event* ».

La qualité de l'air des cabines d'avion et les phénomènes de sa contamination font l'objet ainsi d'une attention croissante de la part des personnels navigants et des autorités de l'aviation civile.

Des recommandations internationales sont également émises, notamment par l'organisation de l'aviation civile internationale (OACI), dans un contexte de prévention de la mise en péril de la sécurité aérienne, afin de prévenir les événements de contamination et définir la conduite à tenir lors de ces incidents.

1.2 Objet de la saisine

Dans ce contexte, l'Anses a reçu, en 2019, plusieurs demandes de saisines de la part de la Confédération française démocratique du travail (CFDT), de l'Association des victimes du syndrome aérotoxique (AVSA), du Syndicat des pilotes de ligne (SPL), du Syndicat national du personnel navigant (SNPNC-FO) et du Syndicat national des pilotes de ligne (SNPL).

La demande de la CFDT en date du 17 avril 2019 (Annexe 1), représentée au conseil d'Administration de l'Anses, a été jugée recevable, conformément à l'article L1313-3 du Code de la santé publique. Cette saisine a été discutée avec le comité d'orientation thématique « Santé travail » de l'Anses en mai 2019 et inscrite dans le programme de travail 2020. Des auditions de représentants des organisations qui ont adressé un courrier ont été organisées par l'Anses en décembre 2019 et janvier 2020 et ont permis de préciser leurs attentes et besoins. Suite à ces auditions et après échanges avec son comité d'experts spécialisé « Evaluation des risques liés aux milieux aériens » (CES « Air »), l'Anses a proposé d'apporter son expertise scientifique indépendante pour réaliser un état des connaissances sur :

- les effets sur la santé liés à la profession de personnel navigant. Ce bilan comprend une analyse et synthèse des données chez l'humain notamment épidémiologiques sur les facteurs de risque pour la santé des personnels navigants ainsi qu'une analyse des données relatives au syndrome aérotoxique, à l'origine de la saisine. Bien que l'expertise porte sur le personnel navigant, les données disponibles pour les passagers, et extrapolables au personnel navigant sont exploitées.

- la pollution chimique de l'air des cabines d'avions, hors polluant biologique, d'une part en l'absence d'évènement particulier et d'autre part lors de « *fume events* ». Ce bilan documente les sources d'émission des polluants, les facteurs d'influence, la nature des polluants et leur concentration. L'expertise porte sur les contaminants chimiques quelle que soit leur nature (organique ou minérale), ainsi que les composés particuliers, quelle que soit leur taille.
- les différentes recommandations institutionnelles existantes sur les moyens de prévention des évènements de contamination de l'air de la cabine et la conduite à tenir lors de ces incidents en vol et après les vols.

Après échange avec les demandeurs en juillet 2021 sur la proposition de contrat, il a été précisé que cette expertise s'inscrit dans une stratégie en deux temps. Suite à cet état des connaissances complété également par les résultats des projets de recherche en cours au moment de la saisine (FACTS, AviSan, cf. partie 2.6), une évaluation quantitative des risques pour la santé (EQRS) des personnels séjournant dans les cabines d'avions en lien avec les contaminations de l'air sera réalisée si jugée pertinente et faisable au vu des données collectées.

Remarque : Le champ de l'expertise portant sur la cabine passagers ainsi que sur la cabine de pilotage (cockpit), l'utilisation du terme « cabine », sans précision, inclut dans la suite du rapport les cabines passagers et de pilotage.

1.3 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation

L'Anses a créé un groupe de travail *ad hoc* après appel public à candidature (GT Avions), rattaché au comité d'experts spécialisé « Evaluation des risques liés aux milieux aériens » pour l'instruction de cette saisine.

La réalisation des travaux pour ce rapport s'est également appuyée sur les compétences de différentes unités de l'Anses notamment en charge de l'évaluation des risques liés à l'air et la mission transversale au sein de l'Anses portant sur la veille et l'alerte sanitaire, ainsi qu'en matière de toxicovigilance et de vigilance concernant les maladies professionnelles.

Pour le réseau national de vigilance et de prévention des pathologies professionnelles (RNV3P), l'exploitation des données a été discutée avec le GT « Méthodologie et stratégie d'exploitation des données » entre avril 2021 et février 2023. Un expert rapporteur de ce GT a été nommé pour la réalisation du rapport d'étude.

Pour la toxicovigilance, l'étude a été confiée au groupe de travail « Vigilance des produits chimiques » de l'Anses en septembre 2021 et a été validée en mai 2023. Deux experts rapporteurs médecins toxicologues, ne faisant pas partie de ce GT, ont été nommés pour la réalisation de cette étude.

A noter que la compétence en ingénierie aéronautique n'a pas été couverte au sein du GT Avions. Dans le cadre de ces travaux, le groupe de travail a auditionné des parties prenantes de l'aéronautique.

Des informations relatives aux recommandations institutionnelles existantes sur les moyens d'action ou de prévention ont été collectées *via* une consultation internationale organisée de juin 2022 à octobre 2022.

Le groupe de travail s'est réuni entre mars 2021 et juin 2023. Les travaux d'expertise du groupe de travail ont été soumis régulièrement au CES tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques entre novembre 2019 et juillet 2023. Le rapport produit par le groupe de travail tient compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres du CES.

Ces travaux sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires.

L'expertise a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – prescriptions générales de compétence pour une expertise (mai 2003) »

1.4 Prévention des risques de conflits d'intérêts

L'Anses analyse les liens d'intérêts déclarés par les experts avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise.

Les déclarations d'intérêts des experts sont publiées sur le site internet <https://dpi.sante.gouv.fr/>.

2 Méthode d'expertise

2.1 Axes de travail

Le GT a structuré sa réflexion autour des questions répertoriées dans le Tableau 1. Les méthodes et outils développés pour y répondre sont également présentés. Ils sont détaillés dans les paragraphes suivants.

Tableau 1 : Résumé des questions traitées et de la méthode d'expertise associée pour y répondre

Question principale	Sous questions	Méthode	Chapitre du rapport
Quelle est la population d'étude ?	<p>Quelles sont les caractéristiques des personnels navigants en France : nombre, activités, facteurs environnementaux et conditions de travail, réglementation associée ?</p> <p>Quels sont les données de santé et sinistralité associés à cette profession en France ?</p>	<p>Recherche des données institutionnelles : réglementaire, prévoyance,</p> <p>Extraction des données des bases de données de vigilance et de sinistralité</p>	Chapitre 3
Quels sont les effets sur la santé liés à la profession de personnel navigant ?	<p>Quelles sont les maladies observées chez les personnels navigants ?</p> <p>Quelles sont les données relatives au syndrome aéroportuaire ?</p>	<p>Revue de la littérature (scientifique, grise) à partir des 5 étapes recommandées par l'Anses portant sur les études sur les effets sur la santé chez le personnel navigant</p> <p>Exploitation des données disponibles pour les passagers, et extrapolables au personnel navigant</p>	Chapitre 4
Quels sont les connaissances sur la qualité de l'air dans les cabines d'avions ?	<p>Comment s'opère le renouvellement de l'air dans la cabine ?</p> <p>La qualité de l'air des cabines est-elle réglementée ?</p> <p>Quelles sont les sources des polluants mesurés dans l'air des cabines ?</p> <p>Qu'est-ce qu'un « <i>fume event</i> » et comment est-il caractérisé ?</p> <p>Quels sont les polluants mesurés en cabine et à quel niveau de concentration, d'une part en l'absence d'évènement particulier/en conditions habituelles de vol et d'autre part lors de « <i>fume event</i> » ?</p>	<p>Echange avec les parties prenantes lors d'auditions (Ingénierie aéronautique et constructeurs)</p> <p>Revue de la littérature (scientifique et grise) à partir des 5 étapes recommandées par l'Anses documentant les sources, polluants, gammes de concentration dans l'air des cabines ou cockpit d'avions</p>	Chapitre 5

Question principale	Sous questions	Méthode	Chapitre du rapport
Quelles sont les recommandations institutionnelles existantes sur les moyens de prévention des événements de contamination de l'air de la cabine et la conduite à tenir lors de ces incidents en vol et après les vols ?		Examen de la littérature grise et informations recueillies dans le cadre d'une consultation internationale afin de décrire les mesures existantes en termes de prévention et de gestion Echange avec les parties prenantes lors d'auditions (DSAC, compagnies aériennes)	Chapitre 6

2.2 Revue de la littérature et littérature grise

Deux démarches de revues de la littérature ont été réalisées afin de recenser, sélectionner, évaluer et synthétiser les données disponibles les plus pertinentes pour établir d'une part l'état des connaissances sur les effets sanitaires chez le personnel navigant et d'autre part l'état des connaissances sur les polluants chimiques et composés particuliers dans l'air des cabines. Ces revues ont été effectuées en suivant les recommandations émises par l'Anses (Anses, 2023) selon les 5 étapes classiques décrites dans le Tableau 2. Les questions ont été formulées sous les critères PECO rappelés dans le Tableau 3. La méthodologie déployée (formulation de la question, critères d'exclusion, modalités d'inclusion), est détaillée dans la partie « Méthode » des chapitres 4 et 5. Les bases de données bibliographiques ont été consultées jusqu'en décembre 2022, avec une veille bibliographique assurée jusqu'au 1er juin 2023. Les articles identifiés dans le cadre de la veille assurée sur 2023 n'ont pas été retenus, car leurs données n'apportaient pas d'éléments complémentaires significatifs.

Tableau 2 : Etapes de la revue de la littérature

Etape		Objectif	Méthode
1	Identification des références disponibles	Identifier les études scientifiques, rapports, thèses ou autres documentations de la littérature grise potentiellement pertinentes par rapport à l'objectif de la revue de la littérature	Source documentaire : 2 bases de données - Pubmed, Scopus, complété par Google Scholar pour certaines thématiques Construction de requête : <ul style="list-style-type: none"> – formulation de la question posée sous le format PECO (Tableau 3) – choix des champs interrogés – validation à l'aide des références transmises par les demandeurs et des projets de recherche FACTS et AVISAN – exécution des requêtes à plusieurs reprises jusqu'en janvier 2022 et mise en place d'alerte pour actualiser les données

Etape		Objectif	Méthode
2	Sélection des études pertinentes	Réaliser une pré-sélection des références pertinentes de celles identifiées à l'étape précédente sur lecture du titre et abstract	Définition des critères d'exclusion Répartition de la lecture simple par les agents de l'Anses Utilisation de l'outil Ryan pour la mise en œuvre et la traçabilité de cette étape
3	Confirmation de l'éligibilité des études sélectionnées	Déterminer l'éligibilité des références retenues à l'issue de l'étape précédente au regard de critères d'exclusion ou d'inclusion formalisés sur lecture du texte intégral	Définition des critères d'exclusion et / ou d'inclusion Répartition de la lecture par les agents et les experts de l'Anses avec double lecture et discussion sur les résultats de lecture en réunion de collectif Utilisation de l'outil Rayyan et d'un tableau Excel pour la mise en œuvre et la traçabilité de cette étape
4	Evaluation de la qualité des études éligibles	Evaluation de la qualité des études éligibles en vue de leur exploitation et synthèse en réponse à l'objectif de la revue de la littérature par extraction des caractéristiques méthodologiques et l'évaluation des risques de biais et limites des études	Utilisation de grilles d'extraction spécifiques en fonction du type d'études : Revue - AMSTAR 2 (Annexe 2) Articles princeps - grille de lecture choisie dans les modèles disponibles à l'Anses pour différents types (études épidémiologiques, toxicologiques ou cliniques) (Annexe 3)
5	Réalisation de la synthèse répondant à l'objectif de la revue	Réaliser une synthèse qualitative ou quantitative des études incluses en fonction notamment de leur qualité telle qu'évaluée à l'étape précédente	-

Tableau 3 : Critères PECO pour la formulation des questions de recherche

Critères	Objectifs
Population	Quelle est la population d'intérêt ?
Exposition	Quel est le facteur auquel la population d'intérêt est exposée ? Quelle est la voie d'exposition à considérer ? Quelle est la fréquence d'exposition ? Où a lieu l'exposition ? <i>etc.</i>
Comparateur	Quelle est le scénario de référence auquel la population exposée est comparée ? Quelle est la population témoin et l'exposition de référence considérée ? S'agit-il d'une population non exposée à l'agent étudié ? <i>etc.</i>
Outcome	Quel est l'effet sanitaire considéré ? S'agit-il de la survenue d'une maladie ? S'agit-il de la mortalité, par cancer par exemple ? <i>etc.</i>

En complément, une revue de la littérature grise a été effectuée afin de rechercher des références potentiellement pertinentes en consultant les sites internet des organismes et institutions en lien avec l'aviation civile et plus particulièrement impliqués dans la qualité de l'air des cabines d'avions. Des requêtes ont été conduites sur les sites internet en France et à l'international : d'autorités compétentes, d'agences sanitaires, de sociétés de médecine

aéromédicale etc. La liste des organismes consultés et des mots clés sont détaillées en Annexe 4.

Des références transmises par les demandeurs à l'occasion de l'audition du 16 juillet 2021 ont fait l'objet d'une base de références sur le sujet et ont servi au test de validation et d'optimisation des requêtes à l'étape d'identification des études potentiellement pertinentes. Les demandeurs ont également transmis des références au fur et à mesure des travaux d'expertise par mail pris en compte jusqu'en juin 2023.

Afin d'évaluer la qualité des revues de synthèse ou institutionnelles, la méthode « *Assessment of multiple systematic reviews (AMSTAR 2)* »¹ a été suivie. Elle s'applique aux revues et méta-analyses et permet à travers une série de questions et un système de cotation de répertorier les points critiques et de prendre en compte différents biais dans l'interprétation des résultats. Certaines adaptations notamment concernant le vocabulaire utilisé dans le questionnaire ont été nécessaires. Une évaluation complémentaire des résultats obtenus avec AMSTAR 2 a pu être réalisée par une double lecture (Annexe 2). Dans la méthode, il n'est pas défini de critères éliminatoires. La note issue de l'évaluation permet de classer les revues selon leur qualité méthodologique.

La qualité des articles princeps a été évaluée avec une grille de lecture interne à l'Anses (Annexe 3).

2.3 Données des réseaux de vigilance et de sinistralités

Afin de compléter les données recueillies *via* la revue de la littérature et documenter la situation en France, les bases de données de santé du Réseau national de vigilance et de prévention des pathologies professionnelles (RNV3P) et des centres anti-poison (CAP) ont été consultées.

Les données de sinistralité propres à cette catégorie de travailleurs ont également été recherchées sur le site internet de la Caisse primaire d'assurance maladie (CPAM). Celui-ci n'a pas permis, au regard de la codification, d'identifier les données de sinistralité propres aux personnels navigants. En effet, les données de sinistralité de la CPAM sont disponibles pour les différents codes NAF (nomenclature d'activité française) mais le code NAF 51.10Z « Transports aériens de passagers » inclut tous les salariés du secteur, sans différencier le personnel navigant, le personnel au sol, les services de maintenances, administratifs, etc. des compagnies aériennes. Quelques données de sinistralité ont été identifiées dans le rapport annuel d'activité de la Caisse de retraite complémentaire des personnels navigants (CRPN) (Cf. §3.2).

2.3.1 Données du RNV3P

Le RNV3P est simultanément un réseau de compétences en santé au travail et santé environnementale, et une base de données sanitaires. Il réunit l'ensemble des 28 centres de consultations de pathologies professionnelles et environnementales (CCPPE) français, dont

¹ La méthode AMSTAR 2 (Shea *et al.* 2017) est une version postérieure de R-AMSTAR (Kung *et al.* 2010), recommandée par le GT MER.

les données de consultations (données démographiques du patient, maladies, expositions, secteurs d'activité, professions, imputabilités entre maladie et exposition, etc.) sont enregistrées dans le système d'information du RNV3P.

L'Anses, en tant qu'animateur du réseau, a pour mission de coordonner les activités du réseau et participe aux travaux scientifiques associés, en partenariat avec la Caisse nationale d'Assurance maladie des travailleurs salariés et indépendants (CNAM), la Caisse centrale de la Mutualité Sociale Agricole (CCMSA), l'Institut National de Recherche et de Sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles (INRS), Santé publique France (SPF) et la Société française de santé au travail (SFST).

Les objectifs principaux du réseau sont :

- de repérer et décrire les situations professionnelles à risque sanitaire en France et les maladies environnementales ;
- de repérer des risques sanitaires (expositions et/ou pathologies) professionnels ou environnementaux émergents ou ré-émergents ;
- d'améliorer et harmoniser les pratiques de diagnostic des maladies liées au travail et à l'environnement.

Les données des CCPPE reflètent un système de recours à l'expertise de médecins spécialistes de la santé au travail et ne sont pas représentatives de l'ensemble des maladies en lien avec le travail sur le territoire français, le recrutement des patients dépendant principalement des médecins, autres professionnels de la santé ou tiers (par exemple avocat, association, etc...) qui les y adressent. Ces données sont utiles dans un objectif de vigilance des risques professionnels ou environnementaux, en permettant de repérer et de décrire des situations à risque sanitaire (ré)-émergentes. Instruits par des spécialistes des maladies en lien avec le travail et l'environnement, les dossiers enregistrés couvrent l'ensemble des maladies suspectées d'être professionnelles (indépendamment des considérations médico-légales d'indemnisation) ou environnementales et documentent précisément les expositions.

2.3.1.1 Les données

Au sein du RNV3P, les données recueillies lors de la consultation d'un patient (données individuelles du patient, données médicales issues de l'examen clinique, données relatives à l'exposition professionnelle ou environnementale du patient) constituent un problème de santé (PS). L'unité statistique de la base est le PS. Quel que soit le motif de consultation, l'avis du médecin du CCPPE s'intègre dans l'une de ces trois activités :

- Le **diagnostic** de l'origine professionnelle et/ou environnementale de la maladie, avec la question de l'**imputabilité** de l'exposition dans la survenue de la maladie. Le médecin cherche un éventuel lien entre les expositions professionnelles ou environnementales du patient et sa maladie. Il estime ensuite la probabilité de lien entre l'affection du patient et chacune des expositions recensées et il attribue à chaque couple « maladie-exposition » un niveau d'imputabilité de :
 - 0 = Pas de relation ;
 - 1 = faible ou douteux ;
 - 2 = moyen (vraisemblable) ;
 - 3 = fort (très vraisemblable).

- L'**orientation, le maintien ou le retour en emploi**, avec la question de la **compatibilité** entre l'état de santé de la personne et son travail actuel ou futur.
- Le **dépistage professionnel**, qui consiste en l'identification par le médecin d'une ou plusieurs **exposition(s) professionnelle(s) nécessitant un suivi médical** des patients exposés ou ayant été exposés.

2.3.1.2 Le codage des données au sein du RNV3P

Les données recueillies lors de la consultation d'un patient documentent un ou plusieurs PS. Ces données sont codées sur le système informatique du RNV3P selon différents référentiels :

- Les maladies principales et secondaires : selon la **Classification Internationale des Maladies**, version 10 (CIM-10). Des codes spécifiques au RNV3P existent en cas d'absence de code CIM-10.
- Les expositions/les nuisances : selon le **Thésaurus des expositions professionnelles** (TEP).
- Les postes de travail : la **Classification Internationale Type des Professions** (CITP) est utilisée pour coder le poste occupé par le patient au moment de la consultation ou en lien avec l'exposition. Depuis 2014, la version de 2008 (CITP-08) est utilisée.
- Les secteurs d'activité : la **Nomenclature d'Activités Française** (NAF) est utilisée pour coder les secteurs d'activité de l'entreprise dans laquelle exerce le patient au moment de la consultation ou en lien avec l'exposition. Depuis 2014, la version de 2008 (NAF-08) est utilisée.

2.3.1.3 Le mémo clinique

Un PS (au travail ou environnemental) contient un champ libre appelé mémo clinique, qui vise à résumer le dossier du patient et à apporter des informations complémentaires non renseignées par les variables codées telles que : dates et niveaux d'exposition du patient aux nuisances identifiées, précisions quant au(x) poste(s) de travail pouvant être associé(s) à la survenue de la maladie lorsque le codage du poste de travail n'est pas suffisamment précis, éventuels facteurs de risque extra-professionnels qui permettent de mieux comprendre le niveau d'imputabilité attribué à l'exposition/(aux) exposition(s) identifiée(s).

2.3.1.4 Type de conclusion possible d'un problème de santé dans le cadre de l'activité de diagnostic

Dans le cadre de l'activité de diagnostic des CCPPE, une conclusion doit être formulée par le médecin expert à la fin de la consultation, selon les 4 possibilités suivantes :

- **Pathologie en relation avec le travail (PRT)** : lorsque l'origine professionnelle de la pathologie est envisagée par le médecin. En pratique, cela suppose qu'au moins une des expositions professionnelles du patient a un niveau d'imputabilité supérieur ou égal à faible.

- **Pathologie en relation avec l'environnement (PRE)** : lorsque l'origine environnementale est envisagée par le médecin. En pratique, cela suppose qu'au moins une des expositions environnementales du patient a un niveau d'imputabilité supérieur ou égal à faible.
- **Pathologie ni professionnelle ni environnementale (ni PRT ni PRE)** : lorsqu'aucune de ces 2 origines n'est envisagée. En pratique, cela suppose l'absence d'exposition ou un niveau d'imputabilité estimé nul pour toutes les expositions identifiées.
- **Absence de pathologie** lorsqu'à l'issue de la consultation, aucune pathologie n'est identifiée par le médecin.

Une synthèse des données issues de la consultation du RNV3P est présentée dans la partie 3.5.1.

2.3.2 Système d'information des Centres antipoison (SICAP)

Les Centres antipoison (CAP) sont des services médicaux situés dans 8 centres hospitaliers universitaires, possédant une expertise en toxicologie médicale. Ils ont une double mission :

- le soin, de par leur unité de télémédecine 24h/24 spécialisée en toxicologie médicale. Constitués de médecins, pharmaciens, et d'infirmiers, ce sont des centres d'information sur les risques toxiques de tous les produits existants, médicamenteux, industriels et naturels. Ils ont un rôle d'information auprès des professionnels de santé et du public, et apportent une aide par téléphone au diagnostic, à la prise en charge et au traitement des intoxications dans le cadre de la réponse téléphonique à l'urgence (RTU),
- la vigilance sanitaire, notamment en tant que structures en charge de l'activité de toxicovigilance sur leurs territoires respectifs.

Depuis 2016, l'Anses assure la coordination de la toxicovigilance et des activités de vigilance des CAP. La toxicovigilance a pour objet la surveillance et l'évaluation des effets toxiques aigus ou chroniques, de l'exposition aux produits naturels ou de synthèse, disponibles sur le marché ou présents dans l'environnement et qui n'entrent pas dans le champ des autres vigilances nationales réglementées (cela exclut notamment le médicament humain). Elle repose sur les données enregistrées dans le système d'information commun des Centres antipoison, le SICAP.

Le SICAP est composé du Service des agents et compositions (SAC) permettant la gestion de la base nationale des produits et compositions (BNPC), et du Service des cas médicaux (SCM) permettant la mise à jour de la Base nationale des cas médicaux (BNCM). Les cas peuvent être individuels (cas unique pour un événement) ou groupés (au moins 2 cas liés au même événement (au même moment et dans un même lieu).

L'imputabilité et la gravité du cas dans le SICAP sont évaluées par le toxicologue qui le prend en charge. L'imputabilité est établie pour les cas symptomatiques selon la méthode d'imputabilité en toxicovigilance. Elle indique la force du lien causal entre une exposition à un agent et la survenue d'un effet de santé (symptôme, syndrome ou maladie). Elle comporte 5 niveaux :

- I0 : imputabilité nulle,
- I1 : imputabilité douteuse/non exclue,

- I2 : imputabilité possible,
- I3 : imputabilité probable,
- I4 : imputabilité très probable.

La gravité est évaluée selon la méthode d'évaluation de la gravité en toxicovigilance (SGT), adaptée du *Poisoning Severity Score* (PSS) pour les intoxications aiguës. La gravité globale d'un cas correspond à la gravité la plus élevée des différents symptômes et/ou signes paracliniques du cas considérés un à un. Le PSS comporte 5 niveaux :

- Niveau 0 : gravité nulle : absence de symptôme ou signe,
- Niveau 1 : gravité faible : symptômes ou signes mineurs, faibles, régressant spontanément,
- Niveau 2 : gravité moyenne : symptômes ou signes prononcés ou prolongés,
- Niveau 3 : gravité forte : symptômes ou signes sévères ou mettant en jeu le pronostic vital,
- Niveau 4 : décès.

Une synthèse des données issues de la consultation des CAP est présentée dans la partie 3.5.2.

2.4 Auditions de parties prenantes

Plusieurs auditions ont été conduites afin de compléter les éléments de contexte, de recueillir des attentes de parties prenantes et d'identifier des données complémentaires. Elles ont fait l'objet de compte rendu qui sont annexés au présent rapport (Annexe 5).

2.4.1 Contexte réglementaire

La direction de la sécurité de l'aviation civile (DSAC) sur les thématiques suivantes :

- L'organisation et les missions de la DSAC
- La réglementation en vigueur sur la certification des avions et les aptitudes en vol des personnels navigant (incluant les pilotes)
- Les *fume events* et le syndrome aérotoxique

2.4.2 Fonctionnement et entretien du système de conditionnement de l'air de la cabine

Afin de recueillir des données sur le fonctionnement du système de conditionnement de la cabine, le Dr Scholz, professeur en conception d'aéronefs, mécanique du vol et systèmes d'aéronefs à l'Université des sciences appliquées de Hambourg (Allemagne) a été auditionné sur les thématiques suivantes :

- Le fonctionnement de la ventilation, de la climatisation et de la filtration dans les avions
- La réglementation en matière de ventilation/climatisation/filtration
- Les incidents liés au système d'air dans les avions, appelés "événements de fumées".
- Les facteurs influençant la contamination chimique des cabines en fonction des phases et des modes d'exploitation des vols
- Les perspectives de solutions qui pourraient être à l'étude ou à l'essai.

Le service de maintenance d'Air France a également été auditionné, sur les thématiques suivantes, pour compléter les données :

- Le fonctionnement et la maintenance du système de ventilation des cabines
- Les *fume events* et le syndrome aérotoxique

2.4.3 Santé des personnels navigants et « Syndrome aérotoxique »

Plusieurs échanges avec l'Association des victimes du syndrome aérotoxique (AVSA), qui est un des demandeurs, se sont tenus en amont de la formalisation du contrat d'expertise afin de bien contextualiser la demande et les attentes de l'association. Une audition s'est également tenue afin de recueillir des éléments complémentaires sur :

- La population des personnels navigants en France
- Les victimes du syndrome aérotoxique en France et à l'étranger

Concernant plus particulièrement la santé et le suivi médical des personnels navigants, le service médical d'Air France a été auditionné sur les questions suivantes :

- L'organisation et les missions du service médical d'Air France
- Les données sur la santé des personnels navigant
- Les *fumes events* et le « syndrome aérotoxique »

Le service médical d'urgences et de soins de l'aéroport Charles de Gaulle, qui peut être le premier service médical qu'un personnel navigant est amené à consulter après l'atterrissage à cet aéroport, a été auditionné sur les thématiques suivantes :

- L'organisation et les missions du Service Médical d'Urgences et de Soins de l'aéroport Charles de Gaulle
- Les *fumes events* et le « syndrome aérotoxique »

Enfin, Corsair a été auditionné sur :

- La gestion des incidents « feux, fumées, odeurs » et plus particulièrement les contaminations de l'air alimentant la cabine
- La santé des personnels navigants

2.5 Consultation internationale

Une consultation a été réalisée en coordination avec la Direction des affaires européennes et internationales de l'Anses auprès d'autorités compétentes de l'aviation civile nationales et internationales. Le questionnaire a été transmis à l'Agence européenne de sécurité aérienne (EASA) et ses membres, ainsi qu'aux Etats-Unis, Canada, Australie et Nouvelle-Zélande en juin 2022, avec une relance en septembre 2022. La liste des organismes consultés par pays est disponible en Annexe 6. Le questionnaire, élaboré en français et en anglais, était composé de trois parties (Annexe 7) :

- Présentation de l'Anses et des objectifs des travaux d'expertise sur « la qualité de l'air dans les cabines d'avion et la santé des personnels navigants »
- Sollicitation de données sur la gestion des événements de contamination de l'air de la cabine
- Sollicitation de données sur la gestion du suivi de la santé des personnels navigants suite à un événement de contamination de l'air de la cabine.

2.6 Projets de recherche

Différents projets de recherche visant à investiguer la pollution chimique dans l'air des cabines d'avions ou les effets potentiels des événements de contamination de l'air de la cabine, communément appelés *fume events*, sur la santé du personnel navigant ont été identifiés en amont de la saisine.

L'EASA a publié deux rapports :

- CAQ report (EASA 2017b) sur les résultats de campagnes de mesures préliminaires de la qualité de l'air de cabines d'avions qui documentent les niveaux de concentration de différents polluants dont des substances liées aux huiles de moteurs.
- AVOIL report (EASA 2017a) sur la toxicité des huiles des turbines d'avion après pyrolyse.

A la suite de ces 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 2020.

L'EASA poursuit actuellement son étude sur la caractérisation physico-chimique des composés résultant d'une fuite d'huile de moteur ou de l'alimentation d'air (Auxiliaire de puissance - APU - cf. partie 5.4.1) ou du délogement de dépôts et de leur impact sur la qualité de l'air de la cabine avec pour objectif l'identification des risques toxicologiques et l'évaluation des niveaux d'exposition des équipages et des passagers (CAQ III).

L'autorité gouvernementale de l'aviation civile aux États-Unis (*Federal Aviation Administration* – FAA) ainsi que la société américaine d'ingénierie du chauffage, climatisation (*American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers* - ASHRAE) mènent également des projets de recherche afin d'identifier les capteurs et les technologies de détection susceptibles de détecter un ou plusieurs contaminants du *bleed air* et d'élaborer un plan d'expériences sur banc d'essai moteurs afin d'évaluer ces capteurs.

Deux études françaises sur la santé des professionnels navigants ont été identifiées.

Il s'agit du projet de recherche AviSAn, financé par l'Anses dans le cadre du programme national de recherche « Environnement-santé-travail » (PNREST) et de l'étude SPACE de l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN).

Les paragraphes suivants présentent un descriptif de ces différents projets de recherche (objectif et méthodes). Les résultats des projets finalisés (CAQ, AVOIL et FACTS) sont présentés dans les parties suivantes du rapport d'expertise.

AVISAN (2018 - en cours) (Bensefa-Colas et Mullot 2019, Bossard 2017)

Le projet de recherche AviSAn a pour objectif d'étudier les expositions professionnelles à l'intérieur des cabines d'avion en lien avec des événements de contamination de l'air de la cabine (événement feux/fumées (EFF)), avec une double approche d'expologie et d'épidémiologie en milieu professionnel auprès d'équipages (personnels navigants et pilotes) de la totalité de la flotte d'une compagnie aérienne française.

Ce projet permettra de :

- Documenter et quantifier les concentrations en polluants chimiques dans l'air des cabines d'avion susceptibles d'entraîner des effets neurotoxiques immédiats et différés (additifs organophosphorés des huiles) : en présence et en absence d'évènements rapportés par les équipages ;
- Identifier les déterminants de ces concentrations liés aux modalités de vol et d'exercice des professionnels ;
- Comparer la symptomatologie et les performances cognitives des personnels navigants, selon leur exposition ou non à des évènements feux/fumées.

Le volet mesurage atmosphérique du projet consiste à effectuer, sur un court pas de temps (1 h environ), des mesures des additifs organophosphorés des huiles, à l'aide d'un appareil portatif développé pour ce type d'évènement. Les mesures seront réalisées pendant tout évènement observé en vol, et systématiquement sur un vol comparable en dehors de tout évènement. Parallèlement, seront aussi relevées les conditions de travail pouvant expliquer certains effets sanitaires rapportés par cette population (horaires décalés, stress, conditions d'ambiance...).

Le volet épidémiologique inclut tous les membres de l'équipage dont le vol a fait l'objet d'une campagne de mesurages en lien (exposés) ou indépendamment (non-exposés) d'un évènement de contamination de l'air de la cabine. Ce volet comprend dans la semaine du vol et à six mois : i) un recueil de la morbidité ressentie ; ii) un bilan médical standardisé réalisé par les services de santé au travail de la compagnie, comportant : une recherche d'effets sur le système nerveux et une évaluation des performances cognitives à l'aide de tests psychométriques validés.

Le nombre annuel d'appareils concernés par un EFF est estimé par la compagnie à 50, impliquant 450 sujets exposés par an. Ainsi, sur deux ans de campagne seront réalisés au total 200 mesurages (pour moitié liés à un EFF) et 1800 bilans médicaux (2*450 chez les exposés, 2*450 chez les non-exposés) à T0 et à T6mois. Les analyses statistiques descriptives et étiologiques permettront d'objectiver l'existence ou non de troubles de santé liés à la survenue d'un EFF.

Ce projet, mené par une équipe composée de l'Hôpital Hôtel Dieu, du Laboratoire d'analyse, de surveillance et d'expertise de la Marine (LASEM) et d'Air France, initié en 2018 est encore en cours, la crise sanitaire liée au Covid 19 en ayant impacté la mise en œuvre.

SPACE. Etude de la Santé du Personnel navigant d'Air France (en cours)

Le projet SPACE de l'IRSN a pour objectif de constituer, pour la première fois en France, une cohorte historique de personnels navigants embauchés par Air France. SPACE a pour objectif

d'étudier la mortalité de cette population, ainsi que ses risques de cancer et de maladies non cancéreuses potentiellement associés aux expositions professionnelles, notamment l'exposition au rayonnement cosmique. Les objectifs spécifiques de SPACE sont (i) de créer la cohorte des PN ayant travaillé à Air France, (ii) reconstituer l'exposition professionnelle au rayonnement cosmique des PN utilisant SIEVERTPN, (iii) comparer la mortalité de la cohorte sur la période 1968-2015 à celle de la population française et (iv) étudier les risques de cancer et de maladies non cancéreuses, potentiellement associés à la dose cumulée de rayonnement cosmique.

Une cohorte de salariés et anciens salariés navigants ayant travaillé à Air France au moins 365 jours consécutifs entre le 1er janvier 1967 et le 31 décembre 2015 sera mise en place à partir des données d'emploi fournies par les services de Ressources Humaines d'Air France. Le recueil de l'ensemble des informations concernant les sujets de la cohorte sera réalisé de façon rétrospective par le Laboratoire d'Épidémiologie de l'IRSN. Ces données sont les suivantes : les données administratives nécessaires à l'identification des personnels navigants, les historiques de carrière, la dosimétrie nécessaire à l'étude de l'exposition aux rayonnements cosmiques, le statut vital et les causes médicales de décès nécessaires à l'étude de la mortalité.

Une première estimation suggère que le nombre de personnels navigants à Air France depuis 1967 serait d'environ 43 000, dont 17 000 encore en activité à ce jour.

Ce projet mené par le Laboratoire d'épidémiologie des rayonnements ionisants (LEPID) est en cours.

Projets de recherche de la FAA et de l'ASHRAE-1830 sur la contamination du bleed air (en cours)

Un consortium de recherche financé par la FAA a mené une étude sur les technologies destinées à surveiller les contaminants du *bleed air* par de l'huile moteur, du fluide hydraulique ou du fluide de dégivrage, et à détecter les événements de contamination en temps réel (FAA 2022).

La FAA a retenu le formaldéhyde, l'acétaldéhyde et les particules ultrafines (PUF) comme marqueurs potentiels de contamination du bleed air à partir de quelques études sur l'air des cabines d'avion (projet VIPR de la NASA (données non publiées), projet de la SAE (projet de recherche SAE E 31B (données non publiées), projets de l'EASA (CAQ et CAQ II) et étude de Crump, Harrison et Walton (2011a, 2011b)). Les principaux objectifs du projet étaient d'identifier les capteurs et les technologies de détection susceptibles de détecter un ou plusieurs des trois contaminants du bleed air retenus et d'élaborer un plan d'expériences sur les bancs d'essai moteur pour évaluer les capteurs avec des quantités contrôlées des trois contaminants. Les capteurs et les instruments ont été identifiés et un plan d'essai a été élaboré. Actuellement, les instruments et capteurs spécifiques testés n'ont pas été entièrement évalués en ce qui concerne leur capacité à détecter la contamination du *bleed air* par de l'huile moteur, du liquide hydraulique ou du liquide de dégivrage. Les données doivent être entièrement analysées et, des données importantes doivent encore être collectées avant de procéder à cette évaluation.

Cette étude est menée en collaboration avec l'ASHRAE dans le cadre du projet ASHRAE1830-RP. Il s'agit d'un projet de recherche pour caractériser expérimentalement la contamination du *bleed air* par des particules, et dont les objectifs sont de (ASHRAE 2019) :

- Déterminer les concentrations de particules et leur distribution granulométrique dans des conditions de fonctionnement représentatives du moteur sur une large gamme de taux de contamination, y compris des taux très faibles.
- Comparer les concentrations de particules et la distribution des tailles résultant de la contamination du *bleed air* par de l'huile moteur, du fluide hydraulique et du fluide de dégivrage dans plusieurs conditions représentatives.
- Comparer les concentrations de particules et la distribution des tailles entre un groupe auxiliaire de puissance (APU) et d'autres types de moteurs.
- Recommander des spécifications de performance pour un instrument de détection des particules comme option potentielle pour répondre aux exigences de détection du *bleed air*.

La FAA précise que l'analyse des données issues de ces expériences est en cours et fera l'objet d'un rapport dans le cadre du projet ASHRAE 1830.

2.6.1 CAQ I et CAQ II (EASA 2017b)

En 2014, l'EASA a lancé deux projets de recherche qui ont été publiés en 2017. Le premier des deux projets concernait une campagne préliminaire de mesure de la qualité de l'air dans la cabine d'avions équipés de systèmes avec *bleed air*² traditionnels, et le second concernait des mesures sur des avions équipés de compresseurs d'air électriques au lieu de systèmes avec *bleed air* (Cf. partie 5.4.1 décrivant les systèmes de ventilation d'un avion). Ces études ont été menées par un consortium composé d'un institut allemand spécialisé dans la recherche en sciences appliquées (*Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V.*), l'École de médecine de Hanovre et les compagnies aériennes Lufthansa, Condor Flugdienst GmbH et British Airways.

Au total des mesures ont été réalisées au cours de 69 vols sur huit types d'avions (61 vols sur des avions à *bleed air*, et huit sur l'avion sans *bleed air*). Les échantillons ont été prélevés lors de phases de vol définies (roulage, décollage et montée, descente et atterrissage, vol complet).

Les résultats des concentrations mesurées au cours de cette étude sont intégrés dans la revue de synthèse effectuée par R. Chen, Fang, *et al.* (2021) présentée dans la partie 5.

2.6.2 AVOIL (EASA 2017a)

En 2017, l'EASA a publié une étude sur la caractérisation de la toxicité après pyrolyse des huiles de turbines utilisées dans l'aviation (projet AVOIL). Parmi les différentes tâches de ce projet l'une a consisté à effectuer une revue descriptive de la littérature sur les mesures des composants de l'huile dans un avion, et une autre expérimentale visant à caractériser chimiquement les huiles moteur/APU, puis à caractériser les vapeurs émises après chauffage d'une part et pyrolyse d'autre part.

² L'air de la cabine de la plupart des grands avions de transport est alimenté en vol par l'air prélevé dans les parties basse et haute pression des moteurs (*bleed air*), voir chapitre 5.4.1.

La revue de la littérature réalisée dans le cadre de ce projet a montré qu'avec le temps les techniques d'analyse des composés qui peuvent être présents dans l'huile usagée ont été améliorées de manière significative. Cela explique probablement le fait que dans la littérature plus ancienne, aucun composé comme des isomères du phosphate de tricrésyle (TCP) n'a été trouvé. En outre, l'étude a montré que la température dans un compartiment moteur d'avion, où les vapeurs d'huile et les produits de pyrolyse peuvent se former, peut atteindre des températures supérieures à 500°C et que, par conséquent, des fumées plus toxiques (contenant du monoxyde de carbone (CO) et du phosphate de triméthylolpropane (TMPP)) peuvent être générées.

Les travaux expérimentaux ont été réalisés à l'aide des deux marques d'huile les plus souvent utilisées : l'une pour les vols bi-couloirs ou long-courriers et l'autre pour les vols monocouloirs ou court-courriers (dont, dans ce cas, des huiles parfois déjà utilisées en opération). Le travail expérimental comprenait la caractérisation chimique de l'huile et des vapeurs d'huile simulées par le chauffage de l'huile en combinaison avec de l'air purifié, et la caractérisation chimique des vapeurs d'huile simulées par le chauffage de l'huile dans des conditions de pyrolyse. Deux étapes de vol ont été simulées, la phase de montée à partir du sol et la croisière. Le montage expérimental de la caractérisation chimique consistait à chauffer l'huile dans une chambre d'émission représentant la cabine. L'essai comprenait deux étapes reproduisant le démarrage du moteur jusqu'au sommet de la montée (chauffage de l'huile de 21°C à 350°C en 30 minutes) et une période de régime permanent (pendant 60 minutes à 375 (± 25) °C), dans des conditions contrôlées et comparables pour chaque huile.

Les résultats de cette étude sont présentés dans la partie 5.4.5.1.

2.6.3 FACTS (European Commission 2020a)

L'EASA a mené entre 2017 et 2019, un projet de recherche nommé FACTS (*Freshaircraft*), dont l'objectif principal est de déterminer les risques potentiels pour la sécurité et la santé résultant de la contamination du *bleed air* dans des conditions de vol de routine et lors d'événement de contamination de l'air de cabine (CAC). Ce projet, conduit par un consortium composé d'organismes de recherche (TNO³, Fraunhofer, VITO), d'un constructeur aéronautique (AIRBUS), d'un équipementier (Honeywell) et de l'institut néerlandais *National Institute for Public Health and the environment* (RIVM), en collaboration avec des sous-traitants et de compagnies aériennes, comprenait 5 tâches :

- Tâche 1. Examen de l'état de l'art et établissement de la base de référence pour le travail : revue systématique de la littérature
- Tâche 2. Contrôle de l'exposition : Identification des causes de la contamination du *bleed air* et évaluation de l'impact sur la qualité de l'air du cockpit/cabine : réalisation d'essais en vol et au sol, avec différentes conditions et manœuvres visant à simuler un événement de contamination du *bleed air*.
- Tâche 3. Évaluation des risques toxicologiques. L'objectif est de tester divers mélanges de fumées sélectionnées pour détecter d'éventuels risques de neurotoxicité.
- Tâche 4. Contrôles techniques : Stratégie d'atténuation des risques.

³ Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek : le TNO est un organisme de recherche indépendant au Pays Bas

- Tâche 5. Conclusions et recommandations.

Les conditions détaillées de réalisation de la tâche 2 sont précisées ci-après, les résultats sont détaillés dans la partie 5.5. Les informations principales concernant la tâche 3 en lien avec le champ de l'expertise sont détaillées ci-après.

Tâche 2 : Identification des causes de la contamination du *bleed air* et évaluation de l'impact sur la qualité de l'air du cockpit/cabine

La survenue d'événements de contamination de l'air des cabines (CAC) étant aléatoire et relativement peu fréquente au regard du nombre de vols effectués, une stratégie de simulation des événements CAC a été élaborée dans le projet FACTS.

Afin de déterminer la contamination de l'air de la cabine/du cockpit par des émanations provoquées, la composition chimique de l'air de cabine et du cockpit a été déterminée lors d'essais en vol (phase de test 1) et lors d'essais au sol (phase de test 2). Des analyses des dépôts sur pièces constitutives du système de contrôle environnemental (ECS) ont également été réalisées.

Lors de la phase de test 1, les émanations de l'avion ont été provoquées par un remplissage excessif du réservoir d'huile moteur, un démarrage simultané du ECS et du groupe auxiliaire de puissance (APU), un démarrage de l'ECS avant que le moteur principal n'ait été stabilisé et l'exécution de certaines manœuvres au cours de la montée, en phase de croisières et au cours de la descente.

Lors de la phase de test 2, une odeur d'huile de moteur dans le cockpit et la cabine a été provoquée avec deux procédures de démarrage à sec anormalement longues de 120 secondes et 240 secondes. Pour être validée, l'odeur devait avoir été perçue par 75% du personnel à bord et un aérotracer devait avoir détecté l'huile moteur.

Dans les deux cas, les ventilateurs de recirculation étaient éteints et l'air fourni à la cabine était composé entièrement de *bleed air*.

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 COVTotal (COVT), composés carbonylés, dioxine/furanes, monoxyde de carbone (CO), dioxyde de carbone (CO₂), ozone (O₃). Les composés à mesurer ont été sélectionnés sur la base des tests menés précédemment, des instruments disponibles et des possibilités d'essais à bord (par exemple, espace et puissance disponible). Selon les composés, les mesures ont été réalisées en continu ou bien ont consisté à effectuer un prélèvement d'air puis une analyse en différé (Cf. partie 5.5 et Annexe 8).

Des mesures par échantillonnage par essuyage ont également été réalisées ainsi que sur des filtres HEPA.

A noter que quatre dispositifs mettant en œuvre la méthode de détection par spectrométrie de mobilité ionique ont été utilisés (aérotracer, GDA, RAID-M, CAQ Pall) permettant de reconnaître un profil d'huile utilisé comme traceur de la pollution.

Initialement le projet envisageait également de réaliser des tests via un simulateur de contamination de l'air de prélèvement (*Bleed Air Contamination Simulator* – BACS). L'objectif

de ce simulateur était de reproduire une large gamme de conditions de fonctionnement de divers types de moteurs commerciaux actuellement disponibles, en s'affranchissant du type ou de l'état du moteur, du type d'ECS et des variations éventuelles entre les systèmes de distribution d'air. Suite à des problèmes techniques, ayant entraîné un retard important, les essais BACS n'ont pas pu être effectués avant la fin du projet de recherche FACTS. Il était également prévu des essais avec injection intentionnelle d'huile dans un véritable moteur à réaction monté sur un banc d'essai moteur, afin d'étudier les conditions réelles du moteur. Ces essais n'ont pas pu être réalisés avant la fin du projet FACTS.

Les résultats des mesures de polluants effectués dans le cadre de cette étude sont détaillés dans la partie 5.5.

Tâche 3 :

L'objectif était de tester divers mélanges de fumées sélectionnées pour détecter d'éventuels risques de neurotoxicité.

- Réalisation d'essais préliminaires :
 - Tests expérimentaux menés afin de tester l'effet et la gamme de toxicité des tricrésylphosphates (TCP) et des mélanges d'huiles et de fumées sur les embryons de poisson-zèbre et les cellules neuronales à l'aide d'un dispositif de génération de fumées d'huile à petite échelle (mini BACS)
 - ⇒ Méthodologie de test notamment de l'activité neuromotrice du poisson-zèbre appliqué et prêt à être utilisé pour des mélanges d'huiles

- Évaluation de six fumées générées avec mini-BACS :
 - Chauffage de différents types d'huiles de moteur et de fluides hydrauliques (représentatifs des huiles les plus couramment utilisées dans l'aviation, ainsi qu'une huile moteur sans tricrésylphosphate) dans des conditions de laboratoire, puis analyse chimique.
 - Caractérisation du mélange fumées/aérosols par la concentration en nombre de particules (*particulate number count*), les composés organiques volatils totaux (COVT), le monoxyde de carbone (CO), les composés organophosphorés (OP), les aldéhydes et les composés organiques volatils (COV).
 - Évaluation de la viabilité cellulaire et la cytotoxicité sur des cellules d'épithélium humain, et le potentiel de neurotoxicité sur des cultures corticales primaires de rat à l'aide d'un réseau de microélectrodes.
 - ⇒ Le test sur le poisson-zèbre n'a pas été effectué en raison d'une collecte d'une quantité insuffisante de pyrolysats.
 - ⇒ L'exposition aiguë (0,5 h) et subchronique (24-48 h) aux vapeurs d'huile a induit une inhibition de l'activité neuronale dans des cultures corticales primaires de rats. Les vapeurs d'huile hydraulique ont un potentiel neurotoxique plus élevé (IC75s : 1-2,5 µg/mL) que les vapeurs d'huile moteur (IC75s : 22-49 µg/mL), évalué à l'aide des IC75s (concentrations calculées qui inhibent l'activité à 75 %). L'augmentation de la durée d'exposition de 0,5 à 48 heures a réduit le potentiel neurotoxique des fumées d'huile hydraulique de 4 à 10 fois. Pour les fumées d'huile moteur, l'augmentation de la durée d'exposition à 48h a un effet variable selon les huiles

(réduction ou augmentation du potentiel neurotoxique). L'analyse de la viabilité cellulaire indique un potentiel cytotoxique limité, soulignant que les vapeurs d'huile exercent un effet neurotoxique fonctionnel.

⇒ Les fumées des huiles moteur 1 à 4 présentaient des profils chimiques comparables entre eux. Les huiles hydrauliques 1 et 2 se distinguent nettement des huiles moteur. Les principales différences entre les condensats des fluides hydrauliques et ceux de l'huile moteur sont la très faible teneur en acides organiques et en aldéhydes.

⇒ limites : le mini BACS est une représentation réduite et simplifiée de la situation d'un système aéronautique. Les fumées générées et se condensant dans le système peuvent être différentes dans la réalité. L'utilisation de systèmes d'essai *in vitro* ne permet pas d'évaluer les risques ou de traduire les niveaux d'exposition en effets potentiels sur la santé.

- Essais biologiques et étude toxicologique *in vivo* par d'inhalation chez la souris sur les effets neurologiques
 - Les expériences prévues initialement dans le projet n'ont pas pu être réalisées, l'approbation du comité d'éthique animale ayant été obtenue une fois le projet FACTS achevé. Ces essais sont repris dans le projet CAQ III en cours (Cf. plus loin).
- Méthodologie d'évaluation du risque toxicologique : L'objectif était d'examiner l'applicabilité des valeurs de référence existantes pour les travailleurs et le grand public et de proposer une approche spécifique afin d'évaluer les risques associés aux produits chimiques présents dans l'air de la cabine. Les résultats de cette tâche sur l'applicabilité des valeurs de référence sont présentés dans la partie 5.4.5.

CAQ III (2021 - en cours)

L'objectif du projet est de fournir, via une série de mesures effectuées dans des environnements contrôlés représentatifs des conditions de vol, une caractérisation physico-chimique complète des composés résultant d'une fuite d'huile de moteur ou d'APU ou du délogement de dépôts et de leur impact sur la qualité de l'air de la cabine. Les particules et les gaz mesurés, leurs quantités, les types et les propriétés des particules, leur mélange et leur répartition entre les phases gazeuse et particulaire de l'aérosol permettront ensuite d'identifier les risques toxicologiques et d'évaluer les niveaux d'exposition des équipages et des passagers.

Le projet est découpé en 5 axes de travail (WP Work Packages) :

WP1 : Toxicologie et identification des risques pour la santé

- Recueil des informations sur les contaminants et leurs niveaux mesurés dans l'air de la cabine à partir de la littérature et comparaison avec ceux mesurés pendant les événements CAC simulés, afin de sélectionner les contaminants qui feront l'objet d'une étude plus approfondie
- Recueil des informations dans la littérature sur les dangers des principaux contaminants, en mettant l'accent sur les symptômes signalés par le personnel navigant et les passagers dans le contexte des contaminations perçues de l'air de la cabine.

- Identification des dangers des contaminants sélectionnés à partir de la documentation recueillie.
- Identification des lacunes dans la littérature toxicologique
- Elaboration des recommandations pour une évaluation complète des risques toxicologiques (en mettant l'accent sur les symptômes signalés chez le personnel navigant et les passagers)

WP2 : Simulation d'événements CAC et caractérisation chimique

- Provocation d'événements contrôlés et réalistes de contamination par l'huile de l'air de purge afin de caractériser de manière approfondie la composition des fumées par des analyses physico-chimiques détaillées en ligne et en différé.
- Essais standardisés d'exposition contrôlée pour l'évaluation toxicologique dans le WP3.
- Dopage de filtres HEPA à l'aide d'un simulateur de contamination du *bleed air*⁴ qui simulera le système d'alimentation en air d'un avion depuis l'orifice de prélèvement de *bleed air*, avec des conditions de pression et de température élevées, jusqu'à la cabine, avec des conditions plus ou moins ambiantes. Ceci permettra de s'assurer que la contamination par les huiles moteurs réalisée dans des conditions contrôlées subit les étapes d'expansion et de refroidissement caractéristiques des conditions réelles le long du trajet de l'air. Ces filtres dopés seront comparés aux filtres HEPA collectés sur les avions en service dans le cadre du WP4.

WP3 : test de toxicité et biosurveillance

- Etude des effets neurotoxiques chez des rongeurs exposés pendant 4 semaines, à différentes concentrations, à de l'air contaminé par des pyrolysats de l'huile moteur la plus couramment utilisée dans les avions commerciaux. Les tests visant à évaluer la neurotoxicité potentielle des fumées à des niveaux n'entraînant pas d'effets pulmonaires marqués comprennent une batterie de tests neurocomportementaux (par exemple, des tests de déficience sensorielle, émotionnelle et cognitive).
- Analyse des biomarqueurs dans le sang et examens histopathologiques des poumons et du cerveau.

WP4 : Filtre HEPA, essai d'avion au sol et échantillonnage ESC

- Analyse des filtres HEPA et des composants du système de contrôle de l'environnement collectés sur des avions en service ainsi que des échantillons collectés lors d'un essai d'avion au sol et des échantillons issus du BACS (cf. WP2). Cette analyse permettra d'identifier les schémas de contamination possibles à la suite de fuites d'hydrocarbures.

WP5 : Consultation de la communauté scientifique et des parties prenantes et diffusion des résultats

- Elaboration d'une stratégie de communication des résultats et de leurs applications.
- Mise en place d'interfaces pour diffuser les résultats et pour encourager la discussion et l'échange d'expertise entre le consortium et toutes les parties prenantes concernées.

⁴ BACS : Bleed Air Contamination Simulator

3 Description de la population de personnels navigants en France

3.1 Définition des personnels navigants

D'après l'article L6521-1 du Code des Transports, « Est **navigant professionnel** de l'aéronautique civile toute personne qui remplit les deux conditions suivantes :

1. *Exercer de façon habituelle et principale, pour son propre compte ou pour le compte d'autrui, dans un but lucratif ou contre rémunération, la fonction de personnel navigant*
2. *Être titulaire d'un titre aéronautique en état de validité ou relever du règlement (UE) 2018/1139 du Parlement européen et du Conseil du 4 juillet 2018 concernant des règles communes dans le domaine de l'aviation civile et instituant une Agence de l'Union européenne pour la sécurité aérienne, et modifiant les règlements (CE) n° 2111/2005, (CE) n° 1008/2008, (UE) n° 996/2010, (UE) n° 376/2014 et les directives 2014/30/ UE et 2014/53/ UE du Parlement européen et du Conseil, et abrogeant les règlements (CE) n° 552/2004 et (CE) n° 216/2008 du Parlement européen et du Conseil ainsi que le règlement (CEE) n° 3922/91 du Conseil ainsi que de ses règlements d'application. »*

Les **navigants non professionnels** sont ceux dont l'activité se limite généralement au vol de loisir non soumis à rémunération, dont les titulaires :

- D'un brevet et d'une licence de pilote d'aéronef ultraléger motorisé,
- D'un brevet et d'une licence de Base de pilote d'avion,
- D'une licence de pilote d'aéronef léger,
- D'une licence de pilote privé d'avion, d'hélicoptère,
- D'une licence de pilote de planeur ou de ballon.

Les personnels navigants professionnels, sont regroupés en quatre catégories :

Personnel navigant technique (PNT) : d'après l'article L6524-1 du Code des Transports, « le personnel navigant technique est le personnel exerçant les fonctions suivantes :

1. *Commandement et conduite des aéronefs ;*
2. *Service à bord des moteurs, machines et instruments divers nécessaires à la navigation de l'aéronef ;*
3. *Service à bord des autres matériels montés sur aéronefs, notamment les appareils météorologiques ou destinés au travail agricole et les appareils destinés à la manœuvre des parachutes. »*

Personnel navigant commercial (PNC)⁵ : membre d'équipage de cabine, plus communément appelé, hôtesse de l'air ou steward. Il assure deux missions principales :

⁵ D'après le site de la DGAC – Nouvelle-Calédonie : <https://www.aviation-civile.nc/pilotes-et-professionnels/pn-professionnel-pnc-et-pnt> (14/4/2023)

1. Sécurité, sûreté, et secourisme : il veille au respect des règles en cabine à bord de l'avion et applique les procédures associées en cas de nécessité ;
2. Commerciale : il doit être attentif au confort des passagers en garantissant la qualité du service.

Personnel navigant d'essai et de réception (PN ER) : navigant qui a des activités d'essais ou de réception, quelle que soit sa fonction (pilote, technicien, ingénieur...). Ces activités sont définies dans l'article R421-1 du Code de l'aviation civile :

Essais : « Toutes épreuves exécutées en vol, à terre ou à l'eau, sous la direction ou le contrôle des industriels ou des représentants de l'Etat, qui ont pour objet la recherche des caractéristiques en vue de la mise au point des aéronefs ou de leurs éléments constitutifs, et de l'établissement de leur conformité soit à des spécifications, soit à des conditions techniques de navigabilité. »

Réceptions : « Toutes épreuves effectuées en vol, à terre ou à l'eau, en vue de contrôler la conformité individuelle d'un aéronef à la définition de type certifié dans le cas d'un aéronef civil, ou à ses spécifications techniques dans le cas d'un aéronef militaire ou appartenant à l'Etat. »

Personnels navigants du travail aérien (PN TA) : navigant qui utilise un aéronef, dans une opération aérienne rémunérée, à d'autres fins que le transport de passagers, de poste ou de marchandises, ou d'essai et de réception, quelle que soit leur fonction à bord de l'aéronef. Il comprend notamment l'instruction aérienne, les vols de démonstration ou de propagande, la photographie, le parachutage, la publicité et les opérations agricoles aériennes (article R421-1 du Code de l'aviation civile).

Dans le cadre de ces travaux d'expertise, la population d'étude était les personnels navigants professionnels civils, les navigants de l'armée n'ont pas été écartés des requêtes bibliographiques dans l'hypothèse où des données sur cette population seraient applicables aux navigants civils. Il n'a pas été identifié de telles données. Aucune donnée portant spécifiquement sur les PN ER et les PN TA n'a été identifiée, **les résultats de cette expertise portent donc exclusivement sur les PNT et les PNC.**

3.2 Caractéristiques de la population des personnels navigants

Les données présentées dans ce chapitre sont issues du rapport de gestion (2021) publié par la Caisse des retraites du personnel navigant professionnel de l'aéronautique civile (CRPN 2021).

La CRPN est une caisse de retraite complémentaire aux régimes de base des salariés, pour les personnels navigants, qui est réglementaire et autonome. Elle gère notamment le fond de retraite et le fond d'assurance qui est en charge d'indemniser les personnels navigants ou leurs ayants droits en cas de décès en accident aérien ou reconnu imputable au service aérien et en cas d'inaptitude définitive (liée à une cessation d'activité relevant de la CRPN) avec imputabilité au service aérien.

Le rapport annuel de la CRPN de 2021 indique qu'entre 2017 et 2020, 452 personnels navigants ont liquidé leurs droits à pension pour inaptitude définitive, dont 53 pour inaptitude avec imputabilité au service. L'âge moyen des pensionnés pour inaptitude avec imputabilité

au service était de 48,8 ans et de 50 ans pour les pensionnés pour inaptitudes sans imputabilité au service.

La CRPN précise dans son rapport de gestion 2021 que l'arrêt brutal de l'activité du transport aérien en 2020 et la mise en place de l'activité partielle en raison de la crise sanitaire a perturbé l'envoi des Déclarations Sociales Nominatives par les entreprises. Ces données sont provisoires et ne tiennent pas compte de l'activité partielle.

Les données suivantes sont relatives aux personnels navigants actifs affiliés à la CRPN. Les actifs regroupent l'ensemble des affiliés ayant fait l'objet d'une déclaration de la part de leur employeur, d'un versement de cotisations et qui comptabilisent au moins un jour d'activité dans l'année, quel que soit leur catégorie professionnelle.

En 2020, les personnels navigants étaient près de 33 000, très principalement dans le secteur du transport public, 93 % des navigants et principalement des PNC (67 %).

Dans la Figure 1, l'évolution du nombre d'actifs entre 2016 et 2020 montre finalement une certaine stabilité. La CRPN précise qu'en 2020, la baisse du nombre d'actifs s'avère limitée au regard de la crise sanitaire mais s'explique par le recours à l'activité partielle au plus fort de la crise et par un premier trimestre sans impact majeur sur l'activité. En effet, de 2016 à 2019, le nombre d'équivalents temps plein (ETP) a progressé de 16,4 % alors qu'il a diminué de 22,8 % entre 2019 et 2020. C'est le secteur du transport public (PNT et PNC) qui a été le plus impacté avec une baisse de 24 % des ETP entre 2019 et 2020 (Figure 2).

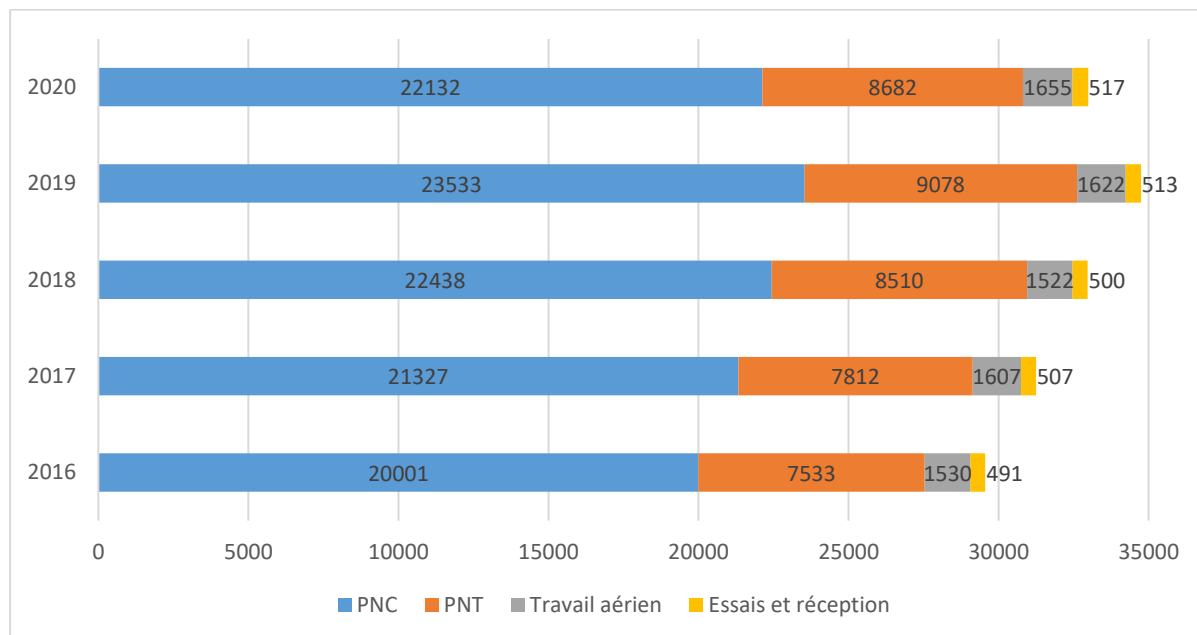


Figure 1 : Évolution du nombre d'actifs par secteur d'activité de 2016 à 2020

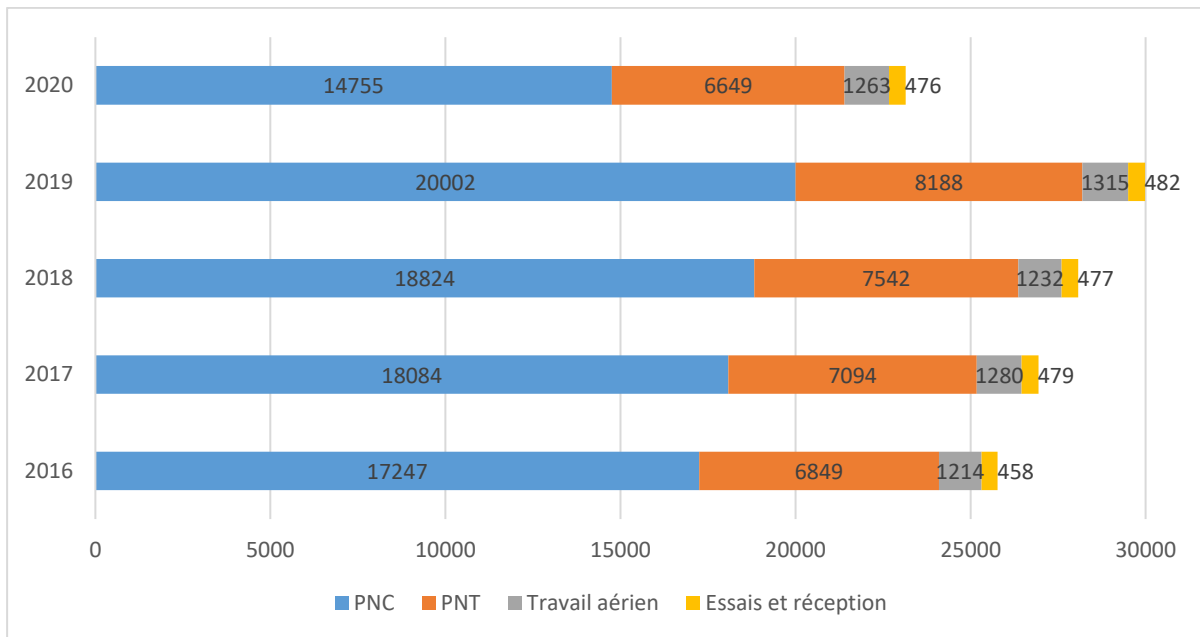


Figure 2 : Évolution du nombre d'équivalents temps plein (ETP) par secteur d'activité de 2016 à 2020

Concernant le ratio hommes/femmes chez les personnels navigants, les hommes représentent 53,4 % des actifs en 2020. Le ratio diffère cependant fortement d'une catégorie professionnelle à l'autre (Figure 3). Par exemple, près de deux fois plus de femmes que d'hommes sont PNC et plus de dix fois plus d'hommes sont PNT que de femmes.

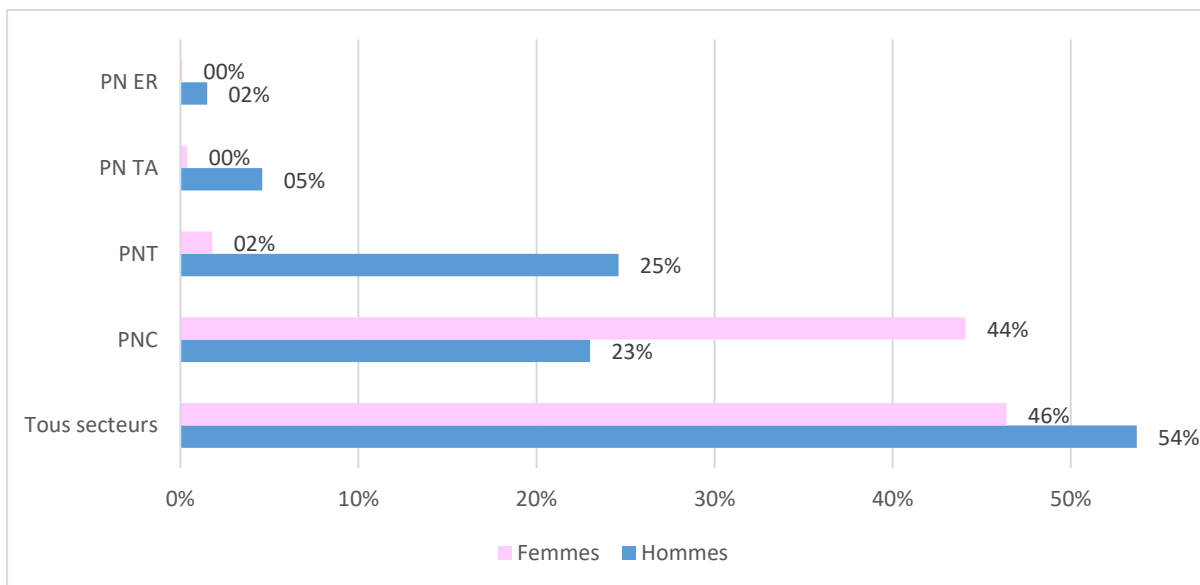


Figure 3 : Part des hommes et des femmes en fonction du secteur d'activité en 2020

L'âge moyen des PN est de 43,8 ans en 2020, il n'y a pas de forte disparité d'âge entre les hommes et les femmes au sein d'un même secteur d'activité. Les personnels navigants d'essai et de réception sont plus âgés que dans les autres catégories professionnelles (Figure 4).

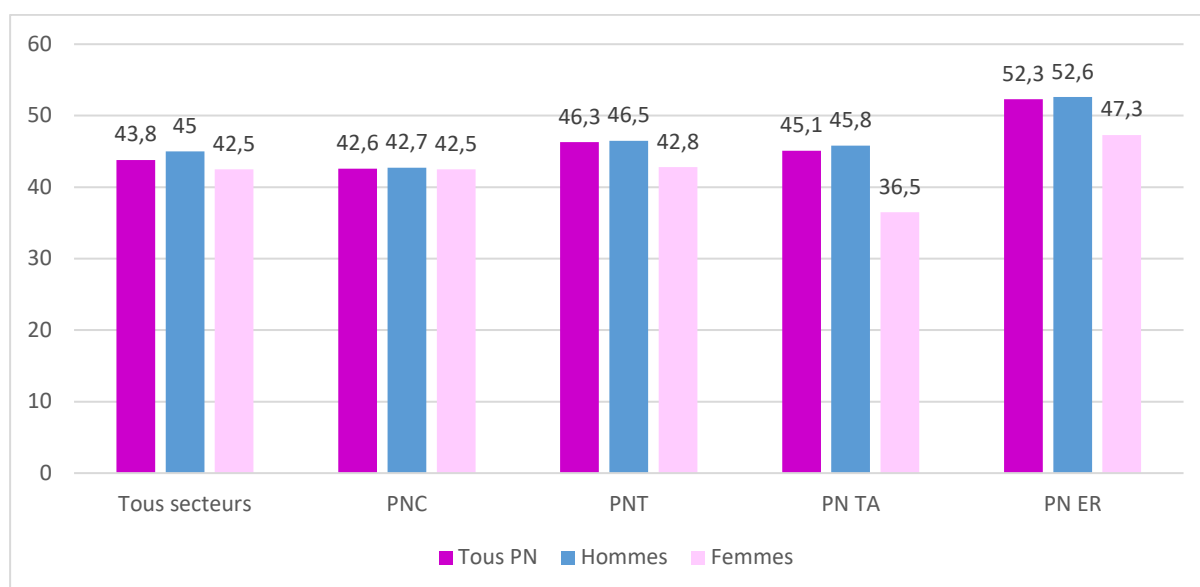


Figure 4 : Age moyen des hommes et des femmes en fonction des secteurs d'activité en 2020

A noter, avec plus de 65 % des personnels navigants en France, la compagnie aérienne Air France est le plus grand employeur de personnels navigants.

3.3 Facteurs environnementaux et conditions de travail

Les cabines d'avion sont alimentées par un mélange d'air provenant de l'extérieur et d'air recyclé (Cf. 5.4.1). L'air extérieur est en général fourni à la cabine par un compresseur et prélevé au niveau des moteurs. L'air prélevé en altitude comporte des caractéristiques particulières telles qu'une faible pression atmosphérique (hypobarie et son corollaire l'hypoxie d'altitude) et une faible humidité et peut exposer à des contaminants atmosphériques ou liés au système d'alimentation de la cabine (ozone, monoxyde de carbone...). La pressurisation des cabines imposée par la réglementation ne peut pas dépasser l'altitude cabine de 2438 m. Il s'agit de condition d'hypoxie/hypobarie modérée. D'autres facteurs que l'exposition à l'air de la cabine sont inhérents à l'exercice de la profession de personnels navigants comme la sédentarité liée à l'endroit clos et exigu des cabines dans lesquelles la circulation est malaisée et réglementée, le décalage horaire inhérent aux transports aériens, l'exposition aux radiations cosmiques, la circulation ou la propagation de maladies infectieuses entre passagers, membres d'équipage et agents aéroportuaires (Silverman et Gendreau 2009).

Les personnels navigants de l'aviation sont exposés au rayonnement cosmique, qui provient de l'espace et augmente avec l'altitude.

Il faut aussi évoquer la particularité de l'exposition au tabagisme passif chez les personnels navigants qui ont connu la période durant laquelle fumer à bord était encore accepté. Le *National Research Council* (NRC) note en 1986 qu'en raison de la forte concentration de fumée de tabac générée dans la zone fumeurs, celle-ci ne peut être compensée par une ventilation accrue dans cette zone, d'autant plus que l'air de la cabine est composé à 50% d'air recyclé. En outre, la séparation stricte de l'avion en zones fumeurs et non-fumeurs n'empêche pas l'exposition des personnels navigant et des passagers non-fumeurs à la fumée de tabac, en raison de l'emplacement des zones de préparations de repas et des toilettes dans

les zones fumeurs. Repace a rapporté en 2004 que les cabines d'avion offraient le volume le plus faible et le taux de ventilation le plus bas par fumeur de tous les locaux sociaux, y compris les bars et les salons pour fumeurs. Les mesures individuelles montrent qu'il y avait peu de différence d'exposition à la fumée de tabac environnementale entre les agents de bord affectés aux sections fumeurs et ceux affectés aux sections non-fumeurs des cabines d'avion. En France, il est interdit de fumer dans les transports publics, dont les avions, depuis le 1^{er} février 2007, en application du Décret n° 2006-1386 du 15 novembre 2006. Ce décret fixe les conditions d'application de l'interdiction de fumer dans les lieux affectés à un usage collectif, mais certaines compagnies avaient déjà institué des vols non-fumeurs sur la France dès 1990 et vers l'Europe dès 1993, et des vols totalement non-fumeurs sur l'Amérique du Nord à partir de 1998.

Les différents facteurs environnementaux et conditions de travail en vol affectant l'exposition des personnels navigants sont esquissés sur le schéma suivant (Figure 5). Les spécificités de l'exposition des personnels navigants sont explicitées en Annexe 8.

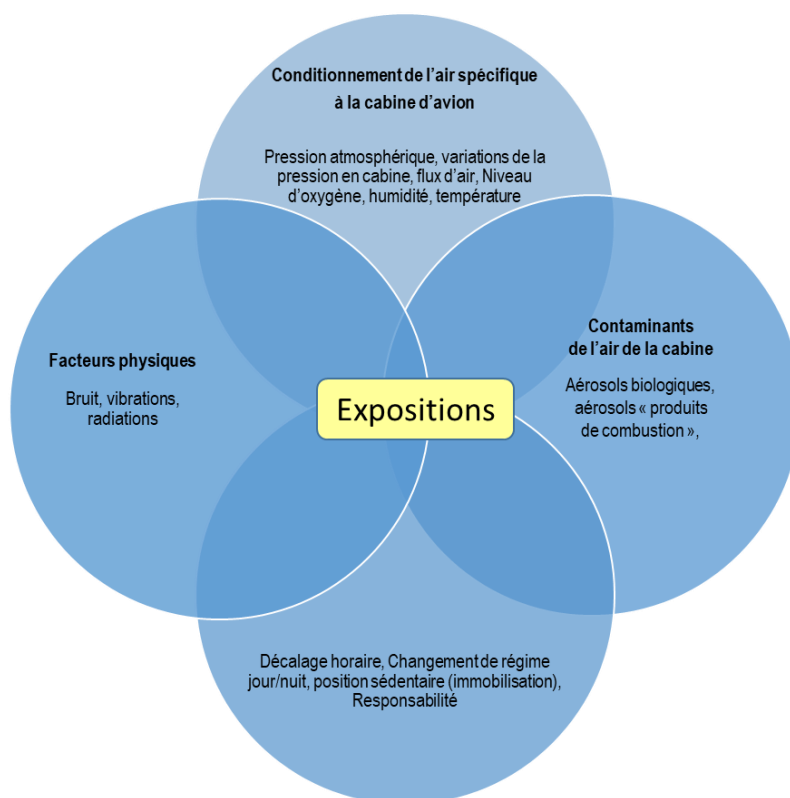


Figure 5 : Facteurs et condition de travail des personnels navigants en vol (d'après European Commission 2020b)

En France, les durées de travail des personnels navigants sont réglementées par les articles D422-1 à D422-15 du Code de l'aviation civile. Les paragraphes ci-après détaillent les durées maximales de vol et les jours de repos, respectivement définis dans les articles D422-4-1 et D422-2.

En préambule, conformément à l'article D422-1 du Code de l'aviation civile, « *On appelle temps de vol le temps décompté depuis le moment où l'aéronef commence à se déplacer en vue de gagner l'aire de décollage jusqu'au moment où il s'immobilise à la fin du vol. N'est pas considérée comme temps d'arrêt la durée des temps de vol effectués comme passager lorsque le déplacement est imposé par des nécessités de service.* »

Les durées maximales de temps de vol effectuées dépendent du nombre d'étapes effectuées par le personnel navigant (Tableau 4).

Tableau 4 : Durée maximale du temps de vol effectué du personnel navigant

Périodicité	Durée maximale	Durée minimale	Formule de calcul
Annuelle	900 heures	850 heures	900 - (n étapes effectuées en fonction - 200) x 1/6.
Trimestrielle	265 heures	-	-
Mensuelle	90 heures (ou 95 heures, 4 mois non-consécutifs par an)	85	90 (ou 95) - (n étapes effectuées en fonction - 20) x 1/6

Les temps d'arrêt périodiques à la base d'affectation des personnels navigants (indépendamment des temps d'arrêt qui suivent obligatoirement les périodes de vols), dépendent de la durée des vols (Tableau 5).

Tableau 5 : Durées minimales des temps d'arrêt périodiques des personnels navigants

Type de vols	Durée minimale
Petits et moyens parcours	36 heures consécutives par semaine
Longs parcours	4 jours consécutifs par mois

3.4 Aptitude aéromédicale des personnels navigants

Les personnels navigants relèvent du Règlement européen n° 1178/2011 modifié de la Commission du 3 novembre 2011 déterminant les exigences techniques et les procédures administratives applicables au personnel navigant de l'aviation civile conformément au règlement (CE) n° 216/2008 du parlement européen et du conseil (version consolidée au 31/01/2022 jusqu'au règlement (UE) 2021/2227 du 14/12/21) dit « *Aircrew* ». L'annexe IV « PART – MED » de ce règlement concerne l'aptitude médicale des personnels navigants.

En effet, l'impératif de sécurité pour les passagers, les pilotes et l'ensemble des populations, impose aux pilotes de passer un examen médical spécifique afin d'éliminer tout problème d'ordre médical sur le plan physique et mental qui pourrait entraîner une incapacité subite ou subtile incompatible avec le vol. Cet examen médical se pratique dans des Centres Aéromédicaux ou chez des médecins aéromédicaux agréés par la Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC). La liste des médecins et des centres aéromédicaux agréés où il est possible d'effectuer une visite médicale d'aptitude est disponible sur le site du Ministère de la

Transition écologique et de la Cohésion des territoires⁶. Cet examen médical permet de délivrer aux personnels navigants le Certificat Médical d'Aptitude au Vol, indispensable pour pouvoir exercer les privilèges d'une licence de pilotage.

Les navigants privés, les personnels navigants commerciaux (PNC) et les navigants pour les licences de pilote d'avion léger peuvent être expertisés par tous les médecins aéromédicaux agréés par la Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC), tandis que les navigants professionnels (classe 1 et en dehors des cas d'admission) ne peuvent être expertisés que par les médecins aéromédicaux agréés pour délivrer des certificats d'aptitude de classe 1 pour leur visite de renouvellement (visite d'admission uniquement en Centre Aéromédical Agréé).

La périodicité du Certificat Médical d'Aptitude au Vol dépend de l'âge et du type de licence (Tableau 6).

Tableau 6 : Périodicité du certificat médical d'aptitude Commission Européenne 2011

Type de licence	Périodicité
PNT Navigants professionnels	Avant 40 ans : tous les ans Entre 40 et 60 ans : <ul style="list-style-type: none"> • Tous les 6 mois pour les activités de transport aérien commercial de passagers monopilote • Tous les ans dans les autres cas Après 60 ans : tous les 6 mois
Navigants privés	Avant 40 ans : tous les 5 ans Entre 40 et 50 ans : tous les 2 ans Après 50 ans : tous les ans
LAPL	Avant 40 ans : tous les 5 ans Après 40 ans : tous les 2 ans
PNC	Tous les 2 ans

Le règlement précise que le demandeur de certificat médical est déclaré inapte lorsqu'il présente l'une des affections médicales suivantes qui implique un degré d'incapacité fonctionnelle susceptible d'interférer avec l'exercice en toute sécurité des privilèges de la licence demandée ou de rendre le demandeur brusquement incapable d'exercer ces privilèges (point MED.B.005 du règlement) :

- 1) Anomalie congénitale ou acquise ;
- 2) Affection ou invalidité à caractère actif, latent, aigu ou chronique ;
- 3) Blessure, lésion ou séquelle d'opération ;
- 4) Effet indésirable ou secondaire résultant de la prise de toute médication thérapeutique, diagnostique ou préventive, prescrite ou non prescrite.

⁶ https://www.ecologie.gouv.fr/aptitude-aeromedicale-des-personnels-navigants#scroll-nav_6 (consulté le 21/11/2022)

3.5 Données issues des réseaux de vigilance

3.5.1 RNV3P

Démarche :

L'objectif premier de l'extraction réalisée est d'identifier et de décrire les pathologies en relation avec le travail (PRT) du personnel navigant du secteur aérien vu par les CCPPE.

Aucun code CIP ou NAF disponible ne permet d'identifier directement la population d'intérêt, i.e. le personnel navigant du secteur aérien. Aussi, pour définir la population d'étude, plusieurs étapes ont été mises en œuvre.

Une extraction exploratoire a été effectuée sur l'ensemble de la base nationale d'analyse du RNV3P figée le 07 juin 2022, pour identifier les problèmes de santé (PS) relatifs aux postes de travail suivants :

- CIP-08 « 3153 - Pilotes d'avions et assimilés »
- CIP-08 « 5111 - Agents d'accueil et stewards »

Il s'avère que le code CIP-08 « 5111 - Agents d'accueil et stewards » concerne tout aussi bien du personnel du secteur du transport aérien, ferroviaire ou maritime ou encore des agents d'accueil commerciaux, touristiques, etc. Aussi, l'ensemble des dossiers obtenus avec ces deux codes CIP-08 a été parcouru afin d'identifier les différents secteurs d'activité se rapportant à du personnel travaillant dans les domaines de l'aérien ou de l'aéronautique. Les codes et libellés NAF suivants ont ainsi été retenus et concernent à la fois du personnel navigant à bord d'avion (i.e. la population cible) mais aussi du personnel au sol (travaillant en aéroport) :

- NAF-93 « 62.2Z - Transports aériens non réguliers »
- NAF-08 « 51 - Transports aériens »
- NAF-08 « 51.10Z - Transports aériens de passagers »
- NAF-08 « 51.21Z - Transports aériens de fret »
- NAF-08 « 30.30Z - Construction aéronautique et spatiale »
- NAF-08 « 84.22Z - Défense »

Des pilotes d'essai et des pilotes de l'armée peuvent appartenir respectivement aux secteurs de la construction aéronautique et de la défense.

Aucun critère de recherche de la base de données ne permettant de discriminer automatiquement ces 2 populations, il a été nécessaire de considérer les précisions relatives au poste de travail renseignées dans le mémo clinique des cas. De même pour discriminer le personnel navigant du personnel au sol, il a fallu s'appuyer sur les informations contenues dans le mémo clinique des dossiers, voire interroger les centres ayant vu les patients.

L'extraction ciblée de la base nationale d'analyse figée le 07 juin 2022, incluant l'ensemble des PS notifiés entre 2001 et 2021 par les 28 CCPPE répartis sur le territoire français métropolitain (N=329 442), a été réalisée en plusieurs étapes décrites sur la Figure 6. Les critères suivis sont détaillés dans le rapport en Annexe 9. Il est rappelé que ce sont des centres

de recours à l'expertise, dont les données collectées ne prétendent pas être représentatives de l'ensemble des maladies observées en santé au travail.

Dans un second temps, une attention a été portée à l'identification des PRT dont le mémo clinique ou les données codées mentionnent l'expression « syndrome aérotoxique » ou sont évocateurs d'un événement de santé ou de manifestations cliniques qui pourraient être en relation avec des expositions dans l'air pressurisé de cabines d'avion, d'après les médecins experts des CCPPE.

L'identification a été réalisée à partir des informations des mémos cliniques sur la présence de l'un ou l'autre des critères suivants :

1) la mention, dans le mémo clinique, des termes « syndrome aérotoxique »

et/ou

2) la description, dans le mémo clinique, d'exposition(s) dans l'air intérieur d'une cabine d'avion susceptible(s) d'être rapprochée(s) de la maladie rapportée (p. ex. : évocation de *fume event*, « d'exposition à des fumées d'huile de moteur ») et/ou « d'odeurs âcre/d'huile brûlée/de combustion d'huiles moteur ») et/ou la présence, parmi la liste des expositions professionnelles identifiées et codées comme ayant pu jouer un rôle dans la survenue de la maladie rapportée, d'exposition(s) dans l'air intérieur d'une cabine d'avion (p. ex. : A16D0000 - huile, graisse et fluide d'usinage industriel ; A16D0300 - produit dégagé lors de la fabrication ou l'utilisation d'huile et graisse industrielle ; A1660B00 - vapeur ou liquide de solvant, diluant ; A16W09ZZ - autre fumée).

Les consignes de codage du niveau d'imputabilité ayant évoluées au fil des années au sein du RNV3P, une analyse complémentaire a été menée avec ces mêmes critères sur les PS conclus en « ni PRT ni PRE » c'est-à-dire sur les PS pour lesquels aucun lien entre la maladie et la/les exposition(s) professionnelle(s) et environnementale(s) identifiée(s) n'a pu être établi par le médecin expert, l'imputabilité entre la/les exposition(s) ayant alors été codée = 0.

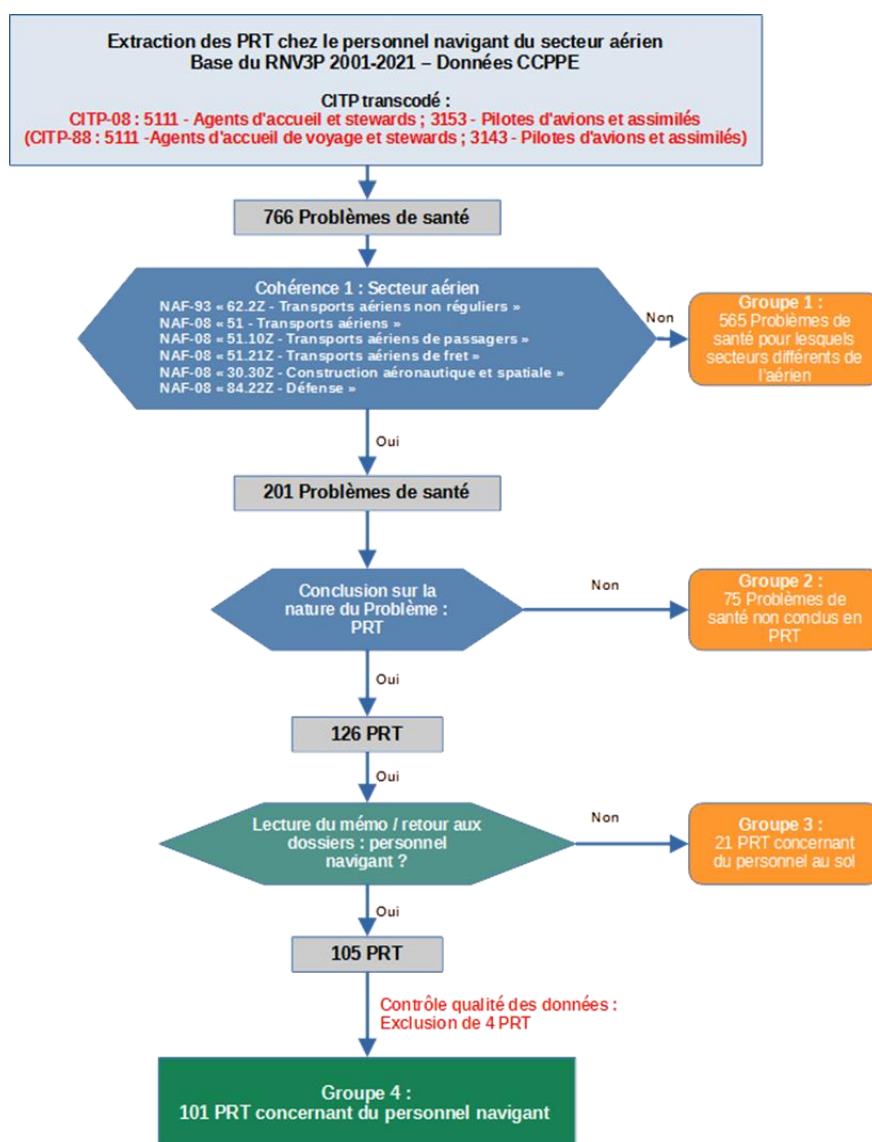


Figure 6 : Démarche d'identification des pathologies en relation avec le travail (PRT) concernant le personnel navigant du secteur aérien

Résultats :

Entre 2001 et 2021, 101 pathologies en relation avec le travail (PRT) concernant du personnel navigant du secteur aérien (i.e. personnel se trouvant à bord lors de vol en avion) ont été enregistrées dans la base du RNV3P, dont 68 en lien avec une exposition professionnelle d'imputabilité maximale jugée moyenne (N=28) ou forte (N=40). Les 33 PRT en lien avec une exposition professionnelle d'imputabilité maximale jugée « faible » correspondent à des pathologies pour lesquelles une forte incertitude existe en termes de probabilité de lien avec l'exposition professionnelle, mais qui néanmoins ne peut être complètement exclue au regard des informations disponibles lors de la consultation médicale.

La majorité des 101 PRT ont été diagnostiquées à partir de 2016. Elles concernent une proportion équivalente de femmes et d'hommes. Le poste de travail « hôtesse de l'air/steward » est davantage représenté (57%) que le poste « pilote d'avion et assimilé » (43%).

Ces PRT concernent très majoritairement (à 80%) du personnel du secteur du transport aérien de passagers. Les autres PRT concernent du personnel navigant du transport aérien sans précision (7%), du secteur de la construction aéronautique et spatiale (6%), du secteur de la défense (6%) ou encore du transport aérien de fret (1%).

Parmi l'ensemble des PRT identifiées, les psychopathologies ainsi que les cancers sont les plus fréquemment rapportés (22% et 21% respectivement). Viennent ensuite les troubles du sommeil (13%), les « intoxications » correspondant à des manifestations cliniques rapportées à des substances (10%), les troubles musculo-squelettiques (TMS) (7%) et les troubles de l'audition (6%). Les autres PRT (22%) sont de nature diverse (maladies des voies respiratoires, dermites, maladie infectieuse, etc.).

Le « syndrome aérotoxique » n'est actuellement désigné par aucun code/libellé spécifique de la CIM-10 ou propre au RNV3P, du fait de l'absence de consensus médical sur sa définition. De même, il n'existe pas non plus de consensus scientifique sur les expositions susceptibles d'être à l'origine de ce syndrome. Aussi, les dossiers évoquant des manifestations cliniques possiblement en lien avec des expositions chimiques dans l'air intérieur de cabine d'avion ont été identifiés sur jugement d'expert, à partir des informations contenues dans les mémos cliniques (mention textuelle de ce syndrome et/ou de toute exposition dans l'air intérieur d'une cabine d'avion rapportée par le patient) et/ou du codage de la maladie principale et des expositions professionnelles. Les dossiers ainsi identifiés présentent une forte hétérogénéité de codage des expositions possiblement imputables à la maladie diagnostiquée ou aux symptômes rapportés. Le médecin du CCPPE ne pouvant investiguer précisément la nature des expositions rapportées par le patient, celles-ci doivent être considérées avec prudence, sans conclure avec certitude que les dossiers ainsi identifiés correspondent à des cas de « syndrome aérotoxique ».

Parmi les 101 PRT retenus dans l'étude, 20 PRT ont un mémo clinique ou des données codées qui indiquent des manifestations de santé qui pourraient, d'après les médecins experts des CCPPE, être en relation avec des expositions dans l'air pressurisé de cabine d'avion rapportées par le patient. Ces 20 PRT concernent en majorité des hommes (75 %). Le poste de travail occupé est majoritairement celui de pilote (65 %). Les trois quarts de ces 20 PRT concernent du personnel navigant du transport aérien de passagers (pilotes ou hôtesses/stewards), les 25 % restants étant du secteur de la construction aéronautique et spatiale (tous pilotes). Hormis 1 cas, l'ensemble de ces PRT a été enregistré entre 2017 et 2021. A ces 20 PRT s'ajoutent trois autres dossiers non conclus en PRT (concernant 2 pilotes et une hôtesse de l'air), qui évoquent dans leur mémo clinique des expositions dans la cabine d'avion rapportées par les patients pour lesquelles un lien avec la maladie ne peut être totalement exclu malgré le codage « d'absence imputabilité » de l'exposition professionnelle indiqué.

3.5.2 CAP

Démarche

Une analyse des dossiers colligés dans la BNCM a permis d'extraire les cas rapportés au réseau des CAP entre le 1^{er} janvier 2000 et le 31 décembre 2021, suite à une suspicion d'altération de la qualité de l'air en avion.

Pour cette étude, les cas d'intérêt étaient définis comme correspondant à des situations où une ou plusieurs personnes avaient rapporté une odeur inhabituelle ou manifesté des symptômes, ressentis comme étant en lien avec une altération de la qualité de l'air de l'avion. L'origine de cette altération était décrite comme provenant du fonctionnement de l'appareil.

Les événements d'intérêt correspondaient à la situation décrite précédemment, sans tenir compte du nombre de personnes à l'origine de l'appel au CAP c'est-à-dire qu'un événement d'intérêt pouvait correspondre à un cas individuel d'intérêt ou un cas groupé d'intérêt.

Pour identifier ces cas et événements d'intérêt, une recherche par mots-clés a été réalisée à partir du champ « commentaire » des dossiers médicaux. Cette recherche a porté sur les mots-clés suivants : cabine, aérottoxique/aerotoxique, pilote, *stewart/steward*, hôtesse/hotesse.

L'ensemble des cas ainsi extraits a été relu en complétant une grille comportant des items complémentaires aux dossiers médicaux des CAP. Suite à cette relecture, ont été exclus les doublons, les dossiers d'imputabilité nulle et les cas pour lesquels l'origine de l'altération de la qualité de l'air paraissait évidente et sans lien avec le fonctionnement de l'appareil (exemple : déclenchement accidentel d'extincteur à incendie).

Les dossiers de gravité moyenne (cf. paragraphe 2.3.2) ont été relus afin de réviser le cas échéant, leur gravité et leur imputabilité.

Le détail de la méthodologie est en Annexe 10.

Résultats

Sur la période du 1^{er} janvier 2000 au 31 décembre 2021, 66 événements ont été identifiés. L'évolution annuelle a montré une augmentation des événements rapportés aux CAP à partir de 2014 jusqu'en 2019, puis une diminution en 2020 et 2021. L'événement était décrit par la perception d'une odeur inhabituelle dans presque un événement sur deux (47,0 %), de « vapeur/gaz » (24,2 %) ou de fumée (19,7 %). Lorsque l'information était connue (80,6 %), l'odeur perçue était décrite majoritairement comme une odeur de « chaussettes mouillées » (8 événements), de « kérosène » (4 événements) et d'« huile de moteur » (4 événements). Les endroits de l'avion où se situait la personne lors de la perception de l'événement étaient le plus souvent le cockpit (33,3 %) ou la cabine (30,3 %). L'événement pouvait être perçu à plusieurs moments d'un même vol (27,3 %) ou uniquement pendant une phase du vol : la croisière (19,7 %), moins souvent l'atterrissage (12,1 %) et le décollage (4,5 %). Quelle que fût l'endroit de l'avion ou la phase de vol, des odeurs inhabituelles étaient le plus souvent rapportées. Des analyses de qualité d'air de l'avion étaient rapportées dans 7 événements, sans résultats disponibles.

Les 66 événements correspondaient à 112 personnes dont 96,4 % étaient des membres de l'équipage (108/112) : 41,1 % d'hôtesse ou stewards (46/112), 32,1 % de pilotes (36/112) et 23,2 % de personnel navigant sans précision (26/112). La plupart (92,9 %) a déclaré des symptômes mineurs, faibles, régressant spontanément. La gravité pour ces cas était alors considérée comme faible (aucun cas de l'étude n'était de gravité moyenne ou forte) et d'imputabilité au moins non exclue. Les symptômes neurologiques ou neuromusculaires étaient les plus fréquents (91,3 %), avec notamment des céphalées, des vertiges et des paresthésies. La seconde classe de symptômes la plus fréquemment rapportée était des signes digestifs (46,2 %) avec nausées, diarrhée et irritation buccale. Les symptômes respiratoires (39,4 %) comprenaient des douleurs oropharyngées, une irritation des voies aériennes supérieures et de la toux. Lorsque l'information était connue, dans la moitié des cas, l'évolution était toujours favorable.

Il est à noter que les CAP ne sont pas contactés de façon systématique et obligatoire lorsque de tels évènements se produisent. Pour autant, dans cette étude, il n'a pas été constaté d'appels distincts provenant de personnes différentes ayant voyagé dans le même avion. Aucune circonstance particulière n'a été identifiée hormis le fait que ces situations étaient majoritairement rapportées par le personnel navigant et correspondaient le plus souvent à une odeur inhabituelle perçue. Les troubles de santé allégués étaient non spécifiques et sans gravité, ne se rattachant pas à un toxidrome connu. Enfin, dans certains cas, les personnes faisaient un lien entre les odeurs perçues et des émissions d'organophosphorés, sans qu'aucune analyse de qualité de l'air intérieur de l'avion ne permette de confirmer cette hypothèse. Or, en l'absence de marqueurs biologiques d'effets ou d'exposition pertinents, de telles analyses sont nécessaires pour objectiver une altération de la qualité de l'air de l'avion.

4 Etat des connaissances des effets sanitaires liés à la profession de personnel navigant

4.1 Objectif

L'objectif de cette partie est de présenter un état des connaissances relatives aux effets sur la santé chez les personnels navigants. Sont documentées les maladies étudiées en lien avec l'exposition de cette profession. Il s'agit principalement d'études de morbidité et de mortalité chez les personnels navigants recensées dans la littérature.

Compte tenu du contexte de la saisine, une analyse spécifique est également effectuée sur les études et données relatives au « syndrome aérotoxique ».

4.2 Méthode

La méthodologie générale de cette expertise est décrite au chapitre 2. L'objectif de cette partie est de préciser les éléments de requêtes bibliographiques qui ont été effectuées pour documenter les effets sanitaires liés à la profession de personnels navigants suivant les cinq étapes décrites au chapitre 2.2.

Identification des références disponibles

Afin d'identifier les effets sur la santé chez les personnels navigants des requêtes bibliographiques ont été conduites dans Scopus® et dans PubMed® dans un premier temps, puis complété par Google Scholar sur certaines thématiques.

Deux requêtes ont été construites, à partir des mots clefs identifiés suivant la structure PECO, adaptée à la problématique. Dans un premier temps, des requêtes ont été élaborées pour identifier les données épidémiologiques sur les personnels navigants et dans un second temps celles sur le « Syndrome aérotoxique » (Tableau 7).

Tableau 7 : Structure PECO pour la requête bibliographique sur la santé des personnels navigants

Thématique	Cible	Mots-clés
<u>Population</u>	Personnels navigants	<i>Aircrew, flight crew, crew member, pilot, flight attendant, aviator</i>
<u>Exposition</u>	Cabine d'avion	<i>Airplane, Aircraft, flight, cockpit, airliner</i>
<u>Comparateur</u>	Passager et population générale	<i>Passenger, traveller, frequent flyer</i>
<u>Outcome</u>	Évènement de santé	<i>Health, outcomes, disease, mortality, morbidity, epidemiology, association, toxicology, risk assessment, aerotoxic syndrome</i>
<u>Temporalité</u>	Pas de limitation dans le temps	

La première stratégie de recherche élaborée est représentée sur la Figure 7, avec l'interrogation de plusieurs groupes de mots clés sur tous les champs pour PubMed® et en limitant sur le titre, l'abstract et les mots clés dans Scopus®.

En premier lieu, une stratégie de requête large a été proposée puis affinée au vu du nombre élevé de résultats, supérieur à 13 000 références, avec l'ajout de termes d'exclusion et en restreignant à un type de documentation ou d'études.

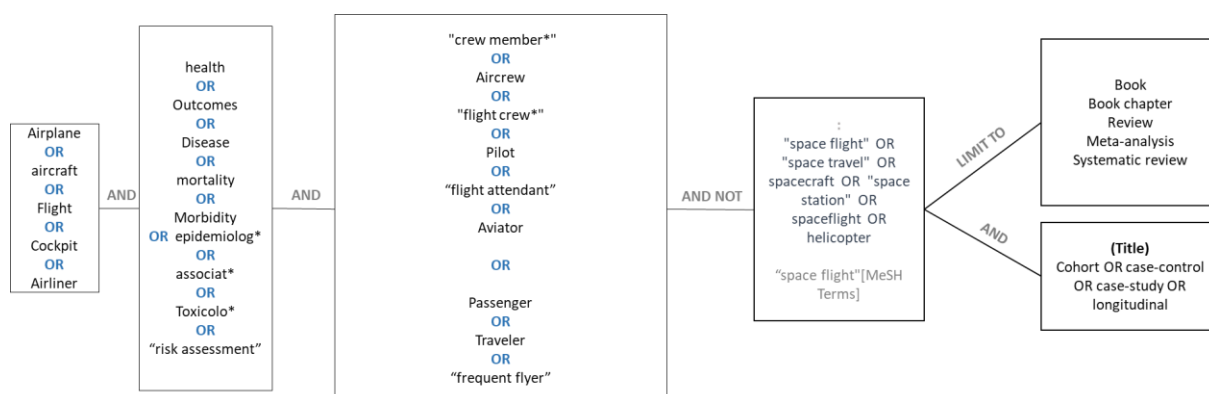


Figure 7 : Requêtes pour l'identification des données sur les effets sur la santé chez le personnel navigant

Les requêtes ont été complétées à l'issue de l'étape d'éligibilité. Lors de cette étape une analyse des données disponibles dans les revues par maladie a été conduite ce qui a permis d'identifier les maladies pour lesquelles il y avait peu de données : thrombose chez les personnels navigants, troubles mentaux, neuropathies, troubles du système endocrinien, respiratoire et cardiovasculaire, troubles de la reproduction féminine et troubles musculosquelettiques (TMS).

Enfin, afin d'identifier les données publiées après les revues, des requêtes complémentaires ont été conduites pour chaque maladie (Cf. Annexe 11).

Concernant le « syndrome aérotoxique » une requête a été conduite avec le mot clé « *aerotoxic syndrome* » sur tous les champs pour PubMed® et en limitant sur le titre, l'abstract et les mots clés dans Scopus®. Une recherche complémentaire a été effectuée dans Google Scholar avec le terme « *aerotoxic syndrome* ».

Les requêtes ont été validées à l'aide de la base constituée des références bibliographiques transmises par les demandeurs, des projets FACTS et AVISAN. Les articles de ces bibliographies portant sur les maladies des personnels navigants ont bien été retrouvés dans les requêtes en date du 26 novembre 2021. Concernant le « syndrome aérotoxique », neuf articles transmis par les demandeurs et 6 références de la bibliographe du projet FACTS n'ont pas été identifiés dans les requêtes conduites sur Scopus et PubMed. Une requête complémentaire a par conséquent été conduite sur Google Scholar, ce qui a permis de les identifier.

Toutes les requêtes retenues et détaillées en Annexe 11 ont été générées pour la dernière fois le 31/12/2022. Une veille bibliographique a été assurée jusqu'au 1^{er} juin 2023.

En complément, compte tenu des facteurs de risques potentiels rencontrés par les personnels navigants dans le cadre de leur activité professionnelle (Cf. §3.3), les monographies du CIRC documentant ces facteurs de risque ont été recherchées.

Sélection des données pertinentes

Pour cette étape de tri des références sur le titre et le résumé des références, un ensemble de critères d'exclusion a été défini (Tableau 8 et Tableau 9).

Tableau 8 : Critères d'exclusion pour la sélection des données de santé des personnels navigants hors syndrome aérotoxique

Thématique hors champs de l'expertise	Critères d'exclusion
Contamination biologique	<ul style="list-style-type: none"> • Risques infectieux avions et voyages • Risques liés à des parasites
Conditions médicales	<ul style="list-style-type: none"> • Prévention des thromboses chez les voyageurs • Condition médicale préexistante et aptitude à voler pour les personnels navigants et les passagers • Dépendance (tabac, alcool, drogue...) et effets médicaments chez les personnels navigants • Effets sanitaires chez pilotes de chasse liés aux contraintes physiques (installation dans le cockpit, impact vitesse /G) • Analyse clinique chez un nombre limité de personnels navigants basés (étude de cas) • Mal de l'altitude
Médecine aéronautique	<ul style="list-style-type: none"> • Conditions, critères d'évaluation et évolution de l'aptitude • Facteurs de performance chez les personnels navigants
Gestion trafic aérien	<ul style="list-style-type: none"> • Accidents / accidentologie / sécurité aviation • Développement trafic aérien / aéronautique • Gestion aéroport / gestion terrorisme • Gestion accident médical en vol
Autre	<ul style="list-style-type: none"> • Transport médical aérien • Epandage aérien agriculture • Armement / développement militaire • Espace • Hélicoptère

Concernant le syndrome aérotoxique, les études de cas ont été retenues à ce stade.

Tableau 9 : Critères d'exclusion pour la sélection des données de santé des personnels navigants - syndrome aérotoxique

Critères d'exclusion
<ul style="list-style-type: none"> • Risque infectieux • Etudes sur méthodes d'analyses (chimique ou biochimique) • Traitement médicamenteux ou détoxification • Aspects judiciaires • Qualité de l'air – fonctionnement du système de ventilation dans la cabine • Etude sur la toxicologie de substance

Confirmation de l'éligibilité des données sélectionnées

Cette étape vise à confirmer la sélection des articles, lors de l'étape précédente sur la base de la lecture du texte intégral. Les critères d'exclusion de l'étape précédente sont utilisés, à cela s'ajoutent les articles publiés dans des langues autres que le français ou l'anglais.

Concernant les données épidémiologiques chez le personnel navigant, les méta-analyses et revues ont été étudiées en priorité. Ces types d'études consistent à synthétiser les résultats de plusieurs études ; les méta-analyses permettant d'obtenir une estimation plus précise et fiable de l'effet du facteur considéré sur l'évènement de santé étudié. Les articles, notamment les plus récents, qui n'ont pas été pris en compte dans les revues ou méta-analyses ou les articles portant sur des maladies ne faisant pas l'objet de revues ou méta-analyses, ont été retenus pour compléter les données. A cet effet, les études de cohortes existantes ont été recherchées à partir des références épidémiologiques sélectionnées.

Concernant le syndrome aérotoxique, les références sont principalement des études de cas et des études investiguant les polluants pouvant être à l'origine des symptômes ressentis notamment par la recherche de biomarqueurs.

Cette étape a été réalisée de façon combinée avec l'évaluation de la qualité des études.

Evaluation de la qualité des données éligibles

L'évaluation de la qualité des données s'est faite sur la base de la grille Amstar 2 pour les revues et de la grille de lecture pour les article princeps (Cf. chapitre 2.2).

Dans le cadre de cette expertise, différents types d'études chez l'humain ont été sélectionnés, répondant à des objectifs différents et complémentaires :

- Les **études épidémiologiques étiologiques** visent à identifier les facteurs qui augmentent (ou diminuent) le risque de développer une maladie à l'échelle de populations. Elles reposent sur des études essentiellement observationnelles : suivis de cohortes de travailleurs exposés, ou d'adultes en population générale ; études comparant les profils d'expositions professionnelles de malades à ceux de non-malades, appelées études cas-témoins. Les revues et méta-analyses fournissent une analyse synthétique voire statistique des résultats de ces études. Les études de bonne qualité prennent en compte très généralement, dans l'établissement d'une association entre un facteur de risque donné et une maladie, les autres facteurs de risque connus de cette maladie. Ainsi, l'épidémiologie ne permet pas d'inférer des relations déterministes (du type : être exposé conduit nécessairement à être malade) mais repose sur un raisonnement probabiliste : appartenir à un groupe exposé augmente la probabilité de tomber malade, en tenant compte d'autres facteurs de risque. Elles sont celles qui apportent le plus d'informations utiles en testant la validité d'une hypothèse d'effet causal entre un indicateur d'exposition et un indicateur de santé dans une population.
- les **études épidémiologiques descriptives** fournissent des informations sur la santé d'une population (par ex, prévalence d'une maladie ou tendance temporelle de cette prévalence sur une période donnée) ou son exposition à des facteurs de risque (ici, l'exposition à des agents chimiques) sans examiner l'association entre les deux ;
- les **études expérimentales** testent la validité d'une hypothèse d'effet causal entre une exposition, qui est contrôlée, et un indicateur de santé le plus souvent infra-clinique. Elles incluent souvent un faible nombre d'individus, volontaires et en bonne santé ;
- les **études de cas**, reposant sur une analyse clinique qui représente la formulation d'une série d'hypothèses tenant directement compte de la singularité du sujet. A noter qu'il existe des incertitudes entourant l'interprétation de ces études de cas les rendant

inappropriées, sauf exception, à former la seule base permettant de conclure à un rapport causal.

Au niveau de l'analyse en texte intégral, 66 publications ont été jugées de bonne qualité sur les données.

Les effets cancérigènes sont les plus étudiés avec 32 publications au total et font principalement l'objet d'études étiologiques et de méta-analyses, contrairement aux maladies non cancérigènes – cardiovasculaires avec 11 publications, respiratoires avec 10 publications, reprotoxicité féminine avec 6 publications, troubles psycho-sociaux avec 7 publications et musculo-squelettiques avec 6 publications - qui font l'objet d'une littérature plus limitée principalement descriptive. Concernant les cancers liés aux troubles du cycle circadien, la monographie n° 124 de 2020 du Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) a classé comme « probablement cancérigène pour l'Homme » le travail de nuit posté⁷ (Cf. 4.3.1.1). Les études traitées par le CIRC dans le cadre de cette monographie n'ont pas été analysées individuellement ayant déjà fait l'objet d'une synthèse et d'une évaluation dans ce cadre.

A noter, la littérature sur le syndrome aérotoxique comprend de nombreux articles de qualité insuffisante, mais qui cependant posent les bases de la problématique. Ces articles sont repris dans cette expertise avec une analyse de leur biais méthodologiques de façon narrative.

Réalisation de la synthèse

L'analyse des données épidémiologiques réalisée dans le cadre de cette expertise porte sur la relation entre l'exposition liée à la profession de personnels navigants et les effets sur la santé au regard de la littérature scientifique. Six (6) méta-analyses, 17 revues et 43 études originales ont été incluses dans la synthèse (Cf. 4.3.1.2, 4.3.2, 4.3.3, 4.3.4, 4.3.5, 4.3.6, 4.3.7). Cette synthèse s'est également appuyée sur les conclusions et études spécifiques chez le personnel navigant (11 références) issues des 3 monographies du Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) portant sur différents facteurs de risque auxquels le personnel navigant a été ou est exposé au cours de sa carrière professionnelle. La progression du nombre de références retenues à chaque étape est représentée dans le diagramme de flux Prisma (Figure 8).

Pour la partie relative au syndrome aérotoxique, la synthèse repose sur une base de 60 références. L'origine de la terminologie « syndrome aérotoxique » et ses symptômes ainsi que les polluants pouvant être à l'origine des symptômes ressentis sont décrits à partir d'une quarantaine de références. Un vingtaine d'études complémentaires documente des cas cliniques pour lesquelles sont rapportés des troubles suite à des épisodes de contaminations de l'air de la cabine ainsi que la recherche de biomarqueurs.

⁷ Le travail de nuit posté comprend le travail, y compris les voyages transméridiens aériens, pendant les heures normales de sommeil de la population générale. Le décalage, ou la perturbation, des rythmes circadiens physiologiques normaux sont les effets les plus importants du travail de nuit posté (CIRC, 2020).

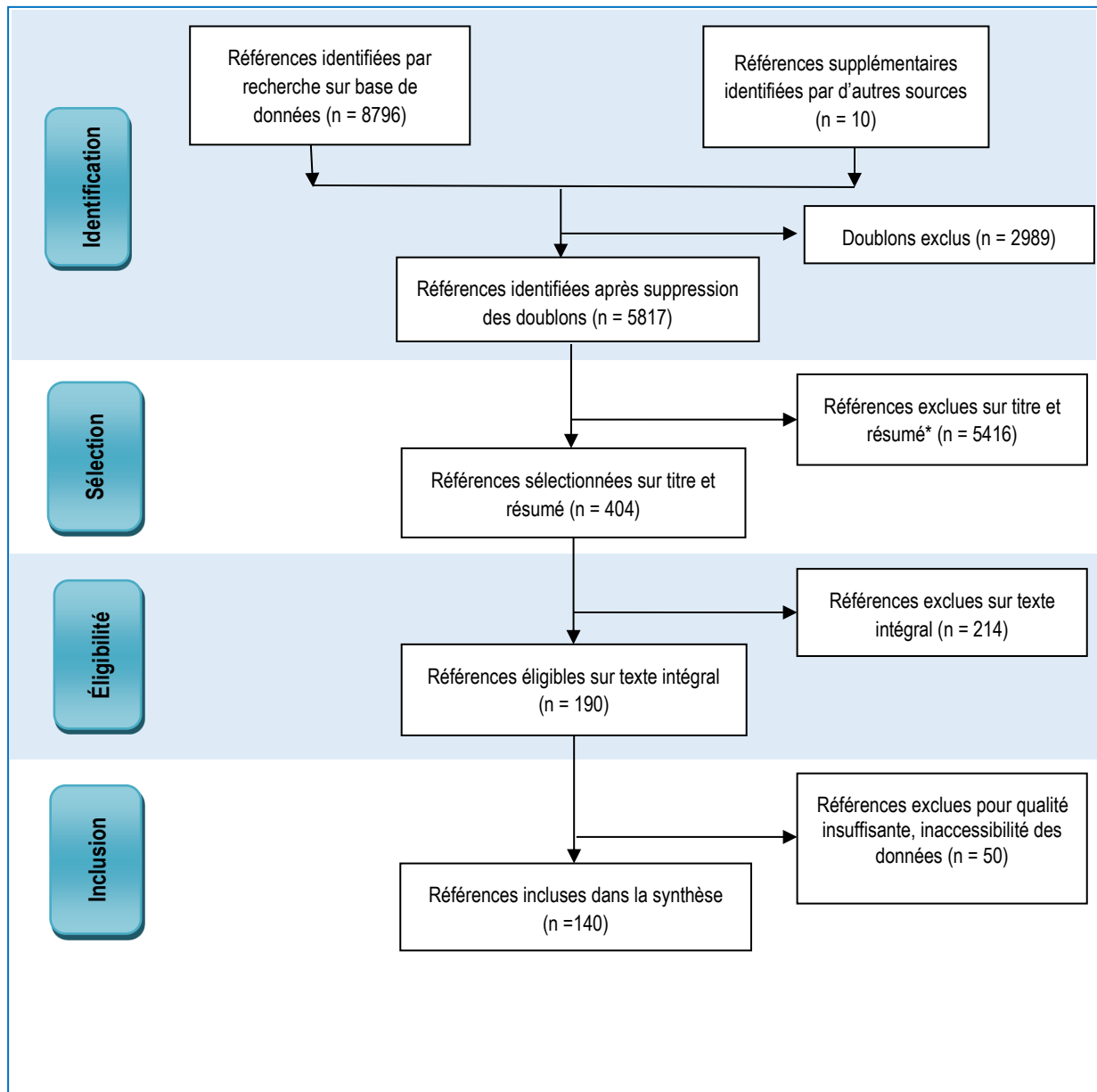


Figure 8 : Diagramme Prisma – Etat des connaissances des effets sanitaires liés à la profession de personnel navigant

4.3 Synthèse des données chez l'humain

Ce chapitre présente d'une part les conclusions des monographies du CIRC documentant les facteurs de risque potentiels rencontrés par les personnels navigants dans le cadre de leur activité professionnelle et d'autre part les données issues des méta-analyses et revues systématiques identifiées dans la revue de la littérature ainsi que les études épidémiologiques récentes. Elles ont été regroupées par maladie. Les données de la revue de la littérature décrites dans cette partie sont synthétisées en Annexe 12.

4.3.1 Cancers

4.3.1.1 Monographies du CIRC et facteurs de risque potentiels

Le Centre international de Recherche sur le Cancer (CIRC) a classé différents facteurs de risque auxquels le personnel navigant a été ou est exposé au cours de sa carrière professionnelle : tabagisme passif, différents types de rayonnements et le travail de nuit posté.

D'après la monographie n° 124 de 2020 du CIRC sur la cancérogénicité du travail de nuit posté⁸, cette profession est particulièrement concernée par le travail pendant les heures normales de sommeil de la population générale et également co-exposée aux rayonnements ionisants notamment cosmique qui dépendent de l'altitude (IARC 2020). Le premier rapport relatif à la qualité de l'environnement des cabines d'avions de l'Académie des Sciences américaine (*National Research Council – NRC*) soulignait en 1986 que les personnels navigants étaient exposés au tabagisme passif dans les cabines d'avions au vu de l'organisation des espaces fumeurs/non-fumeurs et du fonctionnement de la ventilation. La monographie 83 de 2004 du CIRC évaluant la cancérogénicité de la fumée de tabac et du tabagisme passif, rapporte également une exposition importante au tabagisme passif dans des locaux de travail avec zone fumeurs sans ventilation séparée ainsi qu'une exposition des personnels navigants plus élevée que celle de la population générale (IARC 2004).

Le CIRC a classé le **tabagisme passif ou l'exposition à la fumée de tabac environnementale comme « cancérogène pour l'humain »** (groupe 1) en 2004 (IARC 2004). Les données ont mis en évidence une augmentation du risque de mortalité par cancer du poumon aussi bien pour les expositions au tabagisme passif dans les lieux de vie qu'en milieu de travail. Les preuves sont suffisantes pour conclure que le tabagisme passif augmente le risque de cancer du poumon chez les personnes n'ayant jamais fumé. Dans cette monographie, il est également rapporté des indications d'un lien avec les cancers du larynx et du pharynx. Étant donné que la fumée secondaire contient la plupart des constituants de la fumée principale, elle peut aussi être associée à d'autres localisations de cancer.

En 2009, le CIRC a réévalué la cancérogénicité de différents types de rayonnements déjà classés pour identifier des localisations cancéreuses et des mécanismes de cancérogenèse. Ces évaluations ont été publiées dans la quatrième partie (D) du Volume 100 des Monographies du CIRC (IARC 2012). **Différents types de rayonnement - rayonnements ionisants : émetteurs de particules alpha, émetteurs de particules bêta, rayons X et rayons gamma, rayonnement neutronique ; rayonnement solaire ; rayonnement ultra-violet (100-400 nm de longueur d'onde, comprenant UVA, UVB et UVC) -ont été classés comme « cancérogènes pour l'humain » (Groupe 1).**

Parmi les études analysées dans la monographie, plusieurs études ont porté sur les équipages des compagnies aériennes en raison de leur exposition aux neutrons provenant des rayons cosmiques durant les vols en haute altitude. À noter que le rayonnement cosmique du soleil

⁸ Le travail de nuit posté comprend le travail, y compris les voyages transmériidiens aériens, pendant les heures normales de sommeil de la population générale. Le décalage, ou la perturbation, des rythmes circadiens physiologiques normaux sont les effets les plus importants du travail de nuit posté (CIRC, 2020).

et les particules chargées provenant de la galaxie interagissent avec l'atmosphère terrestre et forment des particules secondaires et subséquentes, notamment des neutrons, des protons, des électrons, des positrons et des photons, électrons, positrons, photons et muons positifs et négatifs (UNSCEAR 2008 cité par IARC 2020). La magnétosphère terrestre concentre les rayonnements aux latitudes les plus élevées. La dose de rayonnement reçue par les avions dépend de la latitude, de la longitude et du stade du cycle solaire de 11 ans. L'altitude est le facteur déterminant le plus important du débit de dose, la dose doublant tous les 1500 m (Paretzke et Heinrich 1993 cité par IARC 2020). Les neutrons contribuent largement à la dose de rayonnement cosmique en altitude (Goldhagen 2000 cité par IARC 2020).

Par conséquent, le personnel navigant est l'un des groupes professionnels les plus exposés aux rayonnements ionisants (UNSCEAR 2008 cité par IARC 2020). En fonction des itinéraires de vol, les doses annuelles varient de 0,2 à 9,0 mSv, dépassant la dose de rayonnement naturel de 2 mSv au niveau de la mer (UNSCEAR 2008 cité par IARC 2020). Les doses de radiations ionisantes intégrées au cours de la vie professionnelle restent généralement inférieures à 100 mSv (O'Brien et Friedberg 1994 cité par IARC 2020). Toutefois, les équipages d'aéronefs représentent la plus grande population de personnes exposées à des rayonnements neutrons et la seule population exposée aux protons à haute énergie (Wilson 2000 cité par IARC 2020). À titre d'exemple, les vols long-courriers, tels que les vols de New York vers la région administrative spéciale de Hong Kong, peuvent recevoir des doses de 52 à 102 μ Sv en un seul vol en fonction du stade du cycle solaire de 11 ans (Alvarez, Eastham et Barrett 2016 cité par IARC 2020)

Des augmentations de risque de cancers du sein et de mélanomes ont été observés, mais pas de leucémies. Les auteurs de la monographie ont ajouté que des facteurs de confusion tels que les troubles du cycle circadien, sont susceptibles d'augmenter le risque de tumeurs endocrines. De même, les expositions aux rayons UV sont associées au risque de survenue de mélanomes. La revue de Sigurdson et Ron (2004) synthétise les études et les questions soulevées dans cette population professionnelle et conclut qu'il n'y a pas de relation de cause à effet claire entre le risque de survenue d'un type de cancer en particulier et le fait d'être employé en tant que pilote ou agent de bord (steward et hôtesse de l'air).

En 2020, le CIRC a mis à jour son évaluation de la cancérogénicité du travail de nuit posté dans le volume 124 des Monographies du CIRC. L'organisme a classé **le travail de nuit posté comme « probablement cancérogène pour l'humain » (groupe 2A)**, sur la base d'« indications limitées de cancer chez l'humain », d'« indications suffisantes de cancer chez l'animal de laboratoire » et d'« indications mécanistiques fortes chez l'animal de laboratoire ». Le travail de nuit posté comprend le travail, y compris les voyages transmériidiens aériens, pendant les heures normales de sommeil de la population générale. Le décalage, ou la perturbation, des rythmes circadiens physiologiques normaux sont les effets le plus importants du travail de nuit posté (IARC 2020).

En 2007, le travail posté impliquant une perturbation du rythme circadien avait été classé comme « probablement cancérogène pour l'humain » (groupe 2A), sur la base d'« indications suffisantes chez l'animal de laboratoire » et d'« indications limitées chez l'humain » pour le cancer du sein. Dans cette évaluation actualisée, le CIRC a choisi l'appellation « travail de nuit posté ». La réévaluation a été motivée par le grand nombre de nouvelles études épidémiologiques incluant de nouveaux sites pour le cancer.

Le CIRC a conclu qu'il existe peu de preuves chez l'humain de la cancérogénicité du travail de nuit. Seules des associations positives ont été observées entre le travail de nuit et les cancers du sein, de la prostate, du côlon et du rectum. Concernant l'expérimentation animale, il existe des preuves suffisantes chez les animaux pour la cancérogénicité d'une modification de l'horaire du calendrier lumière-obscurité. Enfin, le CIRC a conclu qu'il existe des preuves mécanistiques solides que la modification de l'horaire lumière-obscurité présente les principales caractéristiques des agents cancérogènes, sur la base des mécanismes suivants des effets compatibles avec l'immunosuppression, l'inflammation chronique et la prolifération cellulaire.

Parmi les études analysées dans la monographie, certaines ont étudié spécifiquement les personnels navigants (personnel de cockpit ou de cabine). En effet, **le personnel navigant est exposé au travail de nuit, à la traversée des fuseaux horaires et à de longues heures de travail** (O'Brien et Friedberg 1994; Hammer *et al.* 2014 d'après IARC 2020). Les résultats sont reportés dans le paragraphe suivant.

Le travail posté de nuit est l'indicateur observationnel le plus courant de la perturbation du rythme circadien (Vetter 2020 d'après IARC 2020). Les vols transmériidiens sont associés au travail de nuit et à une perturbation circadienne supplémentaire en raison de la rapidité des déplacements à travers les fuseaux horaires (Härmä *et al.* 1994 d'après IARC 2020).

Tout comme le personnel de cockpit des compagnies aériennes, le personnel de cabine (par exemple, les hôtesses de l'air) peut être exposé au travail posté et aux perturbations du rythme circadien qui y sont associées. Cette exposition est fortement corrélée à d'autres expositions liées au travail, notamment le rayonnement cosmique. L'exposition au rayonnement cosmique est un facteur de confusion majeur dans l'association potentielle entre le travail posté et le cancer ; cependant, les informations sur ce facteur de confusion ne sont pas disponibles dans la plupart des études.

Deux études de cohorte ont été menées concernant les équipages du poste de pilotage, l'une étudiant la survenue de cancers et l'autre la mortalité par cancer (Pukkala *et al.* 2003; Yong *et al.* 2014), respectivement. L'étude de Pukkala *et al.* (2003) a mis en évidence un risque élevé de mélanome et de cancer de la prostate. La principale limite de cette étude évoquée par le groupe de travail du CIRC est la non prise en compte des radiations d'ultraviolet comme facteur de confusion en particulier pour la survenue du mélanome. L'étude de Yong *et al.* (2014) a, quant à elle, mis en évidence un excès de risque de mortalité par cancer du système nerveux central pour le personnel navigant dans le quartile de dose le plus élevé par rapport au quartile de dose le plus bas, résultat confirmé par l'analyse dose-réponse. Un excès de risque a été observé pour la mortalité par mélanome malin mais aucune tendance positive n'a été observée entre la durée de l'emploi et le mélanome malin. Plusieurs limites ont été rapportées telles que l'évaluation de l'exposition et le faible nombre de cas dans certaines strates de dose.

Concernant le personnel navigant commercial, une étude de cohorte (Reynolds *et al.* 2002) incluant des membres du personnel de cabine d'une compagnie américaine a montré que le risque de survenue du cancer du sein était significativement plus élevé pour les membres du personnel de cabine affectés à des vols internationaux (SIR, 1,62 ; IC à 95 %, 1,10-2,30) que pour ceux affectés à des vols intérieurs (SIR, 1,10 ; IC à 95 %, 0,73-1,60). Les principales limites sont l'absence de prise en compte de facteurs de confusion potentiels et l'évaluation limitée de l'exposition. Une autre étude de cohorte suédoise (Linersjö *et al.* 2011) n'a montré aucune association pour les deux principaux cancers évalués, le mélanome malin et le cancer

du sein. La limite de cette étude est principalement sa petite taille et l'évaluation limitée de la perturbation du rythme circadien. Les cohortes de personnel de cabine de Finlande, d'Islande, de Norvège et de Suède n'ont observé aucune association avec le risque de cancer du sein (Pukkala *et al.* 2003). Dans l'étude de cohorte de Pinkerton *et al.* (2016), dans le sous-ensemble des femmes ayant une parité de trois ou plus, un excès de risque relatif (ERR) statistiquement significatif de 1,5 (IC 95 %, 0,14-6,2) par 4600 fuseaux horaires traversés a été observé. Pinkerton *et al.* (2018) n'ont pas non plus observé d'association avec le mélanome de la peau, le cancer de la glande thyroïde et les cancers de l'appareil reproducteur féminin et les paramètres de perturbation du rythme circadien dans la cohorte du personnel de cabine des États-Unis.

4.3.1.2 Revue de la littérature scientifique

4.3.1.2.1 *Cancers cutanés*

Ballard *et al.* (2000) ont réalisé une méta-analyse sur l'incidence et la mortalité par cancer chez les personnels navigants. Chez les pilotes, il est mis en évidence une incidence augmentée et une surmortalité des mélanomes malins, sans hétérogénéité entre les études. Les risques relatifs étaient plus élevés concernant la mortalité par mélanome que pour l'incidence, et subsistaient après ajustement sur le statut socio-économique (SSE), avec 49 % de mortalité et 7 à 20 % d'incidence du cancer attribuables à la profession de pilote. Chez les PNC féminins, les auteurs retrouvent une incidence augmentée des cancers cutanés. Ballard *et al.* ont mis en évidence des augmentations de l'incidence du mélanome parmi les hôtesses de l'air, par rapport à la population générale. A noter que les analyses dans cette étude ne sont pas ajustées sur des risques professionnels spécifiques, en particulier le nombre total d'heures de vol.

La méta-analyse Fink et Bates (2005) portant sur dix publications sélectionnées entre 1990 et 2002, plus particulièrement consacrée aux cancers cutanés dans des métiers exposés aux rayonnements ionisants, identifiées par l'excès de survenue de leucémies (dont le lien existant avec l'exposition aux rayonnements ionisants est connu), permet d'identifier un excès de prévalence de mélanomes, que ce soit chez les pilotes ou le personnel de cabine. Cependant, les auteurs repèrent dans ces publications des biais potentiels. Les études examinées ont presque toujours ajusté le risque relatif sur l'âge, le sexe et l'année civile de leurs sujets. Or, trois facteurs de risque connus de mélanome ne sont généralement pas pris en compte, à savoir l'origine ethnique, le statut socio-économique et le niveau supérieur d'instruction. Certains chercheurs suggèrent que les élévations constantes des SIR de mélanomes chez les équipages des compagnies aériennes sont les conséquences du temps de loisir passé dans des endroits tropicaux, entraînant une exposition accrue aux rayons UV, plutôt qu'un effet direct de l'exposition aux rayons cosmiques. L'exposition des pilotes aux rayons UV en vol n'est pas considérée comme contributive, car les fenêtres du poste de pilotage offrent une protection contre les rayons UV.

Un autre facteur de confusion évoqué par Fink et Bates (2005) pour expliquer cet excès d'incidence de mélanomes est l'effet du travailleur sain. Cependant, cet effet est généralement moins important dans les études portant sur le cancer que dans d'autres maladies, ce qui est probablement vrai pour le mélanome.

Au total, les auteurs concluent qu'il n'est pas possible d'exclure, à la fin de leur méta-analyse, le hasard et les biais, particulièrement confondants, car la taille des études et le nombre de

cancers étaient généralement faibles, ce qui a pu entraîner une imprécision dans les estimations du risque relatif. La confusion par l'origine ethnique, le SSE ou le niveau d'instruction dans certaines des études pourrait avoir conduit à des risques relatifs de mélanome artificiellement élevés. Cependant, cela n'expliquerait pas nécessairement la corrélation avec le risque relatif de leucémie. Une erreur de classification de l'exposition s'est probablement produite dans la plupart des études, mais son effet aurait généralement été de déplacer les estimations du risque relatif vers le zéro. Si c'est le cas, les vrais risques relatifs de mélanome seraient plus élevés que ceux rapportés. Fink et Bates (2005) pensent donc finalement, qu'il existe des preuves, bien que non concluantes, pour soutenir une telle association.

Une méta-analyse sur l'incidence des cancers chez les hôtesses de l'air (Tokumaru *et al.* 2006) confirme que la cause du risque accru de mélanome malin de la peau n'est pas certaine et que des causes professionnelles et non professionnelles sont susceptibles d'être impliquées. Les populations de cohorte incluses dans la méta-analyse étaient principalement composées de personnes à peau claires. Une précédente étude sur la mortalité n'avait signalé aucun décès par mélanome malin de la peau parmi l'équipage masculin du poste de pilotage chez *Japan Airlines*. Cela pouvait indiquer un facteur ethnique comme facteur de confusion potentiel, bien que la petite taille de l'échantillon puisse amoindrir l'analyse.

En 2015, une autre équipe scientifique, celle de Martina Sanlorenzo de l'Université de Californie (Sanlorenzo *et al.* 2015) a effectué une revue de la littérature scientifique sur le risque de mélanomes chez les pilotes de ligne et chez le personnel navigant des cabines. Les auteurs ont constaté à partir des SIR combinés et séparés que les pilotes et le personnel navigant ont deux fois plus de risque de survenue de mélanome que la population générale. De plus, ils ont constaté un taux de mortalité par mélanome supérieur d'environ 42 % à celui de la population générale (SMR = 1,42 [IC 95% 0,89-2,26] pour PN ; SMR = 1,83 [IC 95% 1,27 - 2,63] chez les pilotes). Cette méta-analyse est limitée, selon les auteurs, par le fait qu'elle ne comprenait que des études observationnelles et surtout rétrospectives. Bien qu'elles aient été standardisées en fonction de l'âge et du sexe, le cas échéant, elles n'ont pas pu tenir compte des facteurs de confusion potentielles. Une autre limitation est que les études incluses ont parfois des définitions différentes des professions liées au vol (équipage de cabine, poste de pilotage, équipage de ligne et pilote), ce qui peut entraîner une hétérogénéité de l'évaluation de l'exposition à des nuisances du milieu professionnel.

En 2019, une méta-analyse réalisée par Miura *et al.* en Australie (Miura *et al.* 2019) montre que les pilotes de ligne et le personnel de cabine ont environ deux fois plus de risque de mélanome et d'autres cancers de la peau que la population générale, les pilotes étant plus susceptibles de mourir d'un mélanome. Cependant, la plupart des preuves ont été recueillies il y a plusieurs décennies et leur pertinence par rapport aux niveaux de risque contemporains semble incertaine.

En France, en 2005, Telle-Lamberton a réalisé une revue des études épidémiologiques sur les travailleurs exposés aux faibles doses de rayonnements ionisants, dont le personnel navigant. Les études ont été sélectionnées à partir de la base de données des références médicales de la *National Library of Medicine (Medline)*. Toutes les études de cohorte ont été

retenues sans restriction de dates. L'auteur a conclu que des excès de mélanomes malins ont été observés chez le personnel navigant. Elle rappelle que cette population est exposée au rayonnement cosmique, aux décalages horaires et a des horaires de travail irréguliers, mais que des facteurs liés au style de vie (exposition solaire) peuvent en partie expliquer ces excès même s'ils semblent insuffisants (Telle-Lamberton 2005).

Copeland de l'Institut médical de l'aérospatial civile d'Oklahoma City, a réalisé en 2011 une revue des publications portant sur l'incidence des cancers en lien avec l'exposition au rayonnement cosmique des équipages d'aéronefs commerciaux, ainsi que sur les lésions chromosomiques et d'autres paramètres pouvant être liés à l'exposition aux rayonnements (Copeland *et al.* 2011). Les auteurs concluent que l'incidence des cancers cutanés (mélanomes et hors mélanomes) est plus élevée, de manière significative, chez les personnels navigants dans plus d'une des études examinées, et n'est pas moins élevée (de manière significative ou non) dans aucune des études revues. Les auteurs soulignent que l'exposition au soleil (dans les loisirs), la perturbation du cycle circadien, l'exposition au rayonnement cosmique, l'historique médical et le type de peau sont des facteurs possibles de l'excès d'incidence de cancers de la peau chez les personnels navigants.

Olsen, au sein de la même équipe que Miura, a réalisé une étude portant sur tous les mélanomes, cette fois histologiquement diagnostiqués chez les pilotes commerciaux au cours de la période 2011-2016 en examinant les données anonymisées au sein du système de dossiers médicaux de l'autorité de sécurité de l'aviation civile australienne (Olsen *et al.* 2019). Compte-tenu du faible nombre de femmes pilotes (6 %), l'étude n'a porté que sur les pilotes de sexe masculin. Plus de 50 % des mélanomes se sont produits sur le tronc, et le sous-type prédominant était le mélanome à propagation superficielle. Dans leur analyse primaire pour le mélanome *in situ*, le nombre de cas observés était plus élevé que prévu sur la base de l'incidence dans la population générale et le SIR était de 1,39 (IC à 95 % 1,08-1,78). Mais dans l'analyse de sensibilité qui a modélisé une augmentation de l'incidence du mélanome *in situ* dans la population australienne, le SIR n'était plus significatif (1,24 ; IC à 95 % 0,94-1,54). Il n'y avait pas d'excès de mélanome de la tête et du cou ou des membres supérieurs, ce qui serait attendu si l'exposition professionnelle aux UV était causale. Pour Olsen *et al.*, l'explication la plus probable de l'augmentation de l'incidence de mélanomes et de cancers baso-cellulaires observée précédemment chez les pilotes de ligne par rapport à la population générale est peut-être liée à des niveaux plus élevés d'exposition récréative au soleil chez les pilotes. Pour Olsen *et al.*, les pilotes de ligne de vols commerciaux australiens n'ont pas un risque élevé de mélanome invasif par rapport à la population générale. Leur étude est la première à rendre compte du risque de mélanome histologiquement confirmé pour une population de pilotes de compagnies d'aviation commerciales de l'hémisphère sud, et la première à rapporter des données sur l'incidence du mélanome pour une cohorte de pilotes avec un suivi récent (2011-2016).

En Norvège, Haldorsen, Reitan et Tveten (2000) ont réalisé une étude rétrospective d'une cohorte de pilotes inscrits à l'administration de l'aviation civile de ce pays et ayant volé entre 1946 et 1994. Il ne retrouvait pas d'excès de cancers par comparaison avec la population générale de ce pays. Des excès de risque ont été trouvés pour le mélanome malin et le cancer de la peau hors mélanome. Pour le mélanome malin, il y avait une tendance significative pour le SIR par dose cumulée. Il concluait que pour la plupart des sites de cancer, l'incidence chez

les pilotes ne s'écartait pas de celle de la population générale et ne pouvait être liée au nombre d'heures de vol ou à la dose de rayonnements subie. Pour compléter, Haldorsen, Reitan et Tveten (2000) ont comparé la localisation corporelle des cas parmi les pilotes avec celle de la population totale. Pour les pilotes, ces cancers n'étaient pas plus souvent retrouvés au niveau de la tête, du cou ou des mains (c'est-à-dire les parties du corps susceptibles d'être exposées dans le cockpit). Pour Haldorsen, Reitan et Tveten (2000), il semble donc plus probable que les excès de risque de mélanome malin et de cancer de la peau s'expliquent par des facteurs liés au mode de vie plutôt qu'aux conditions de travail.

Cashman *et al.* (2007), aux Etats-Unis, ont étudié la mortalité des pilotes appartenant à la *Air Line Pilots Association International (ALPA)*. Pour les mélanomes, le SMR est abaissé à 0,53 (IC 95 % : 0,24-1) parmi les 72972 pilotes masculins et les 3682 pilotes féminines par référence à la population témoin américaine. A côté de l'éventuel effet du travailleur sain, les auteurs expliquent ce ratio abaissé par d'une part la réalisation fréquente des examens de santé et d'autre part, par la méconnaissance probable d'un certain nombre de décès chez les pilotes retraités.

En 2009, Nicholas, Swearingen et Kilmer (2009) ont essayé de distinguer les facteurs de risque professionnels et non-professionnels des cancers de la peau en recueillant les réponses à un sondage Internet confidentiel administré en collaboration avec *l'Air Line Pilots Association International (ALPA)* envoyé à tous les pilotes actifs de quatre compagnies aériennes commerciales américaines. Les pilotes avec un cancer de la peau autres qu'un mélanome ont été comparés à ceux sans cancer en utilisant une analyse multivariée. Les résultats suggèrent que les facteurs associés à une probabilité accrue de cancer de la peau, autre que le mélanome, chez les pilotes volant depuis plus de 20 ans étaient le type de peau à risque, les coups de soleil dans l'enfance et les antécédents familiaux de cancer de la peau autre que le mélanome. L'utilisation d'écran solaire en dehors du temps de travail et les antécédents familiaux de mélanome étaient protecteurs. Parmi les pilotes ayant plus de 20 ans de vol avant le diagnostic, les coups de soleil infantiles et les antécédents familiaux de cancer de la peau autre que le mélanome ont persisté comme facteurs de risque, auxquels s'ajoute le temps de vol en latitude extrême. Cette étude a mis en évidence une augmentation de l'incidence des mélanomes mais pas de la mortalité suggérant que le dépistage précoce du fait de la fréquence des examens médicaux entraîne une baisse de mortalité.

Aux USA, en 2014, Eileen McNeely du département de santé environnementale à Harvard a réalisé une étude parmi les PNC de deux compagnies d'aviation américaine (cohorte *Harvard Flight Attendant Health Study - FAHS*) qu'elle compare à une autre cohorte de santé publique, *National Health and Nutrition Survey (NHANES)* (McNeely *et al.* 2014). Elle retrouve une augmentation du risque de cancers de la peau en proportion du nombre d'années d'emploi de PNC : OR par tranche de 5 années chez les hommes de 1,35 (IC à 95 % : 1,0-1,82) et chez les femmes de 1,27 (IC 95 % : 1,10-1,48). Cependant les conclusions restent limitées par le design de l'étude (transversalité de l'étude, biais de mémorisation potentiel).

Compte-tenu de l'exposition plus importante lors des vols au-dessus des pôles, en 2017, Gudmundsdottir compare l'incidence des cancers chez les pilotes islandais de la compagnie nationale Icelandair à celle des pilotes ayant eu leur licence de vol depuis 1955 mais n'ayant pas volé en dehors du territoire national (Gudmundsdottir, Hrafnkelsson et Rafnsson 2017).

Par rapport à la population masculine générale, le SIR pour le mélanome malin était de façon significative multiplié par 3, tandis que celui des carcinomes basocellulaires (CBC) était de 2,49. Ce risque accru était encore plus élevé chez les pilotes de ligne commerciale, et au contraire plus faible chez les autres pilotes. Les RR de CBC étaient plus élevés au niveau du tronc dans toutes les catégories d'exposition. Le mélanome malin et le CBC sont souvent retrouvés chez les pilotes d'Icelandair, sur le tronc, donc dans une zone non exposée aux UV à l'intérieur des cockpits. Le risque est augmenté avec l'importance des paramètres d'exposition tels que le nombre d'années d'emploi, d'heures de vol cumulées, de la dose de rayonnement cumulée totale et dose de rayonnement cumulée jusqu'à l'âge de 40 ans avec une relation dose d'exposition-réponse.

Pour Miura *et al.*, étant donné que le rayonnement UV solaire est la principale cause environnementale de mélanome et de cancer épidermoïde de la peau, ces données semblent impliquer l'exposition professionnelle aux UV comme cause (Miura *et al.* 2019). Les UV sont indétectables dans les cabines des avions de ligne modernes, et les niveaux dans les postes de pilotage sont soit indétectables, soit non augmentés au-dessus des valeurs au niveau du sol. Cependant, cela n'aurait peut-être pas été le cas pour les avions de ligne opérant au siècle dernier, lorsque les niveaux d'UVA sur les ponts d'envol des compagnies aériennes auraient pu augmenter. Presque toutes les preuves publiées pertinentes sont obsolètes et reflètent les circonstances et les modèles de comportement des pilotes et des équipages de cabine du milieu à la fin du XX^{ème} siècle plutôt que ceux des pilotes et des équipages de cabine d'aujourd'hui. Malgré cela, le risque de mélanome et de cancer épidermoïde parmi le personnel de cabine est augmenté au même degré que celui des pilotes et, par conséquent, l'exposition professionnelle à des niveaux accrus de rayonnement UV est peu susceptible d'expliquer ces résultats. Les biais de diagnostic dus à une surveillance clinique régulière pourraient contribuer à l'augmentation de l'incidence du mélanome et du CBC chez les pilotes et le personnel de cabine. Cependant, on ne s'attendrait pas à ce que cela soit associé à une augmentation de la mortalité par mélanome. L'autre explication des risques accrus de mélanome et de cancer épidermoïde chez les pilotes et le personnel de cabine est l'exposition récréative aux rayons UV solaires pendant les activités récréatives, y compris lors des escales aux destinations finales. Beaucoup de chercheurs pensent que les UV sont la cause du mélanome chez les populations blanches vivant à toutes les latitudes, y compris la plupart des mélanomes chez ceux vivant aux latitudes nord, où toutes les études publiées concernant le mélanome chez les pilotes à ce jour ont été entreprises. Cependant, il n'y a aucune preuve directe pour montrer que les pilotes de ligne et le personnel de cabine ont une exposition accrue aux rayonnements UV récréatifs.

Pour étudier le rôle éventuel des rayonnements cosmiques sur la survenue de cancers, en 2020, Dreger *et al.* publient une mise à jour des résultats d'une étude de suivi d'une des cohortes les plus importantes (Dreger *et al.* 2020). La cohorte comprend, en effet, le personnel de bord et de cabine employé pour la première fois entre 1960 et 1997 chez Lufthansa German Airlines et LTU devenu plus tard Air Berlin (maintenant liquidée). En plus des données d'exposition pour l'équipage du poste de pilotage provenant des études précédentes de la cohorte, la nouvelle analyse utilisait des données récentes du registre fédéral de radioprotection pour tous les membres d'équipage et de nouvelles données historiques reconstruites pour l'équipage de cabine. De façon générale, les RR n'étaient pas significativement différents de 1 par rapport à la catégorie de référence. Pour les cancers liés

aux rayonnements ionisants, dont les cancers cutanés hors mélanome, le RR était significativement augmenté dans la catégorie de dose de 15 à 25 mSv (RR 2,76, IC à 95 % 1,37 à 6,03).

Le rôle du tabagisme passif est aussi mis en exergue dans certaines études, en particulier celle de l'équipe de McNeely en 2018 (McNeely *et al.* 2018). Les ratios de prévalence standardisés (SPR) pour le mélanome et les cancers de la peau hors mélanome chez les femmes étaient de 2,27 (IC à 95 % : 1,27 à 4,06) et de 4,09 (IC à 95 % : 2,70 à 6,20), respectivement, avec des SPR légèrement plus élevés chez les personnes présentant une forte exposition professionnelle à la fumée secondaire de tabac. Tous les SPR rapportés étaient similaires lorsque les populations des études NHANES et *Flight attendant Health study* (FAHS) étaient restreintes aux participants blancs non hispaniques. Une limite de cette étude est l'utilisation de l'ancienneté comme quantification des expositions professionnelles et des informations insuffisantes sur les facteurs de confusion pour certains cancers, tels que l'exposition aux UV pendant les loisirs pour le cancer de la peau. Mais ils rappellent qu'une autre vaste étude n'a trouvé aucune différence dans les habitudes de bronzage entre les agents de bord et la population générale.

En conclusion, les dernières études basées sur des cancers cutanés confirmés histologiquement montrent que si l'incidence peut être augmentée chez les PNT, leurs sièges sur des zones non exposées aux UV laissent à privilégier l'hypothèse que des facteurs non professionnels soient responsables de la survenue et que les examens médicaux répétés permettant un dépistage plus fréquent expliquent cette incidence plus élevée, et une mortalité plus basse que la population de référence. Chez les PNC, il semble aussi exister une augmentation de la prévalence des cancers cutanés en fonction de l'ancienneté dans l'emploi mais les études disponibles ne permettent pas de conclure du fait d'informations insuffisantes sur les expositions aux UV récréatives.

4.3.1.2.2 Cancers du sein et des organes sexuels féminins

La méta-analyse de six études de cohorte du personnel navigant pour une série de causes de décès ou de sites de cancer réalisée par Ballard en 2000, a montré un risque légèrement augmenté de cancer du sein chez les hôtesses de l'air (Ballard *et al.* 2000) même après correction en fonction de la catégorie socio-professionnelle. Il en est de même dans la méta-analyse réalisée par Tokumaru *et al.* (2006) sur 5 études montrant une augmentation significative de l'incidence de cancer du sein.

Dans sa revue de 2005, Telle-Lamberton a conclu que des excès de cancers du sein ont été observés chez le personnel navigant. Elle rappelle que cette population est exposée au rayonnement cosmique, aux décalages horaires et a des horaires de travail irréguliers, mais que des facteurs liés au style de vie ou à la vie reproductive peuvent en partie expliquer ces excès même s'ils semblent insuffisants (Telle-Lamberton 2005).

Dans la revue de Copeland *et al.* (2011) les auteurs concluent que l'incidence des cancers du sein est plus élevée, de manière significative, chez les personnels navigants dans plus d'une des études examinées, et n'est pas moins élevée (de manière significative ou non) dans

aucune des études revues. Les auteurs soulignent que les rayonnements ionisants sont un facteur de risque connu pour le cancer du sein, ainsi que les troubles du cycle circadiens causés par le travail de nuit.

Co et Kwong de Hong Kong, réalisent en 2020 une revue de la littérature internationale réalisée par 2 examinateurs indépendants avec une stratégie de recherche prédéfinie. Dix études (4 américaines, 6 européennes) ont évalué la prévalence du cancer du sein chez les hôtesses de l'air, tandis que 3 études (1 américaine, 2 européennes) ont évalué la mortalité par cancer du sein chez les hôtesses de l'air. La revue de la littérature disponible indique qu'il n'y a pas suffisamment de preuves pour suggérer une association entre l'irradiation cosmique, la perturbation circadienne et le cancer du sein chez les agents de bord. La prévalence et la mortalité par cancer du sein chez les agents de bord sont comparables à celles de la population générale. Les explications avancées par les auteurs sont les suivantes : La collecte de données dans la plupart des études incluses reposait sur les réponses des PNC et non à partir d'un registre du cancer établi. Les membres d'équipage touchés par le cancer du sein étaient plus susceptibles de réagir et de participer à la recherche. Le biais de détection est un autre biais potentiel pour ce type d'étude. Les membres d'équipage de cabine subissent des contrôles de santé réguliers, comme l'exigent de nombreuses autorités aéronautiques. La mammographie ou l'échographie mammaire peut avoir été pratiquée plus fréquemment chez les membres d'équipage de cabine que dans la population générale, ce qui a entraîné une détection accrue de cancers autrement cliniquement occultes. Enfin, l'âge est également un important facteur de confusion pour le cancer du sein. En tant que revue systématique des études sur les taux de cancer du sein chez les agents de bord, les auteurs ont évalué la prévalence du cancer du sein dans un groupe de population active et donc principalement, à un âge plus jeune.

En 2014, McNeely retrouve une fréquence des cancers des organes sexuels féminins (sein, utérus et ovaire) plus grande chez les hôtesses de l'air que dans la population générale ; elle retrouvait une prévalence supérieure de 34 % de ces cancers chez les hôtesses de l'air : le ratio de prévalence standardisé (SPR) était augmenté de manière significative (McNeely *et al.* 2014). La mortalité due aux cancers du sein était augmentée, mais de façon non significative (Blettner *et al.* 2003; Zeeb *et al.* 2003).

Le rôle de la parité est important. Une nouvelle publication en 2018 de McNeely *et al.* met en évidence une association positive entre l'ancienneté professionnelle en tant qu'hôtesse de l'air et le risque de cancer du sein chez les personnes ayant trois enfants ou plus (McNeely *et al.* 2018). Les associations étaient les plus fortes en combinant les sous-groupes de parité avec la mesure de l'ancienneté professionnelle avant l'âge de 45 ans, preuve d'une association entre l'ancienneté en tant qu'hôtesse de l'air et le cancer du sein. Une association un peu plus forte entre l'ancienneté professionnelle et le cancer du sein chez les femmes nullipares est cohérente avec l'état des connaissances biologiques et épidémiologiques, bien qu'il convient de noter que les quelques études antérieures pertinentes parmi le personnel de cabine n'avaient pas montré un risque accru de cancer du sein chez les nullipares par rapport aux participantes multipares.

Alors que McNeely évoque que la fumée secondaire a été associée au risque de cancer du sein dans certaines études, considérée comme un facteur de risque potentiel de ces cancers,

le rôle du tabagisme passif subi avant l'interdiction de fumer à bord des avions n'est pas mis en évidence dans l'étude de Beatty, Haight et Redberg (2011) pour expliquer un éventuel excès de cancers du sein chez les hôtesses de l'air.

En 2020, Dreger *et al.* publient une mise à jour des résultats d'une étude de suivi d'une des cohortes les plus importantes (Dreger *et al.* 2020). Pour les cancers liés aux rayonnements ionisants, dont le cancer du sein, le RR était significativement augmenté dans la catégorie de dose de 15 à 25 mSv (RR 2,76, IC à 95 % 1,37 à 6,03). Les RR parmi les femmes membres d'équipage de cabine n'étaient pas significativement différents de la catégorie de référence.

Au total, si les premières méta-analyses ont mis en évidence une incidence plus importante des cancers du sein chez les femmes PNC, les dernières études récentes indiquent l'existence de facteurs de confusion, en particulier l'exposition au tabagisme passif avant l'interdiction de fumer à bord et la parité en fonction de l'âge au moment des enquêtes.

4.3.1.2.3 Cancers de la prostate

Une augmentation de l'incidence de cancer de la prostate avait été retrouvée en 2000 par Ballard *et al.* alors que la mortalité était faiblement augmentée et de manière non significative. Pour le cancer de la prostate, la correction du statut socio-économique (SSE) a éliminé l'excès de risque de mortalité, mais un excès modéré d'environ 65 % subsistait pour l'incidence avec 40 % des cas incidents attribuables à la profession de pilote.

Cette augmentation de l'incidence peut-elle ne s'expliquer que par l'utilisation systématique d'un examen rectal numérique comme le suggérait, en 2000, Haldorsen dans l'étude d'Air Canada (Haldorsen, Reitan et Tveten 2000). Or, la même procédure est utilisée pour les pilotes de plus de 50 ans en Norvège, mais ne semble pas avoir augmenté l'incidence du cancer de la prostate chez ces pilotes par rapport à celle de la population générale.

Une récente méta-analyse effectuée par Krstev en 2019 sur tous les facteurs de risque professionnels de cancers de la prostate concernait aussi les hommes dans l'aviation, que ce soient les pilotes ou les PNC (Krstev et Knutsson 2019). Dans cette population, il a retrouvé 3 études de cohorte permettant de mesurer les taux d'incidence et de mortalité dans cette population. Parmi ces 3 études de cohorte, on retrouve l'étude européenne des risques de cancer chez le personnel des compagnies aériennes (ESCAPE), une collaboration entre des chercheurs de différents pays européens, qui a étudié le risque de cancer de la prostate chez le personnel navigant. Initialement, neuf cohortes nationales du Danemark, de Finlande, d'Allemagne, de Grèce, d'Islande, d'Italie, de Norvège, de Suède et de Grande-Bretagne ont été incluses. Plus tard a été ajoutée une cohorte de personnel navigant des USA. Dans la méta-analyse de Krstev et Knutsson, réalisée chez le personnel navigant, le méta RR est de 1,26 (IC 95% : 0,90-1,76) mais surtout il est significatif chez les pilotes (méta RR : 1,41 (IC95% : 1,02-1,94)). Le méta RR de cancer de la prostate était augmenté mais de manière non significative parmi tous les hommes à bord. La différence de risque entre les pilotes et le personnel de cabine est difficile à expliquer par un trouble du rythme circadien ou le rayonnement cosmique et pourrait être due à un autre facteur de confusion non contrôlé (Krstev et Knutsson 2019). Le mécanisme proposé pour l'augmentation du risque de cancer de la prostate est que les vols longue distance sur plusieurs fuseaux horaires peuvent induire un trouble du rythme circadien. Cependant, Raslau, cité par Krstev et Knutsson, n'avait pas pu mettre en évidence ce facteur de risque (Raslau *et al.* 2016). Les études d'incidence ont

évalué plus de 90 000 pilotes et les études de mortalité ont évalué près de 20 000 pilotes. Les premières données incluses dans les études dataient de 1946. Quatre études ont évalué des populations en Amérique du Nord, tandis que les six autres ont examiné des populations en Europe. L'estimation de l'incidence du cancer de la prostate était associée à une hétérogénéité modérée. L'estimation de la mortalité par cancer de la prostate était associée à une faible hétérogénéité.

Selon Raslau *et al.*, la non-significativité des données de mortalité peut signifier que l'incidence accrue du cancer de la prostate est limitée au cancer de la prostate de bas grade ou à évolution lente, ce qui ne modifie pas la mortalité de la maladie. Ou cela pourrait suggérer que la petite augmentation de l'incidence n'est pas cliniquement significative. Comme le signalent les auteurs, les résultats de cette étude sont issus d'études observationnelles sujettes à confusion. Il existe des différences entre les facteurs de risque potentiels dans différents pays ainsi que des différences dans les pratiques médicales entre les pays. De plus, certaines études incluses dans l'analyse avaient des données remontant à 1946, tandis que d'autres n'incluaient que des données plus récentes à partir de 1991. L'incidence du cancer de la prostate peut changer au fil du temps et les changements dans la pratique médicale peuvent affecter la mortalité par cancer de la prostate.

Une méta-analyse publiée antérieurement par Erren *et al.* (2008) était consacrée plus spécifiquement aux conséquences des perturbations des cycles nycthémeraux sur le cancer de la prostate ainsi que le cancer du sein pour le personnel féminin, en s'intéressant, entre autres, aux personnels navigants. Lorsque les neuf études contenant des informations sur le cancer de la prostate ont été combinées, elles étaient compatibles avec un excès de risque relatif de 40 % (IC à 95 % = 1,1 à 1,8). Les auteurs notent une remarquable homogénéité des résultats des études individuelles. Cependant, compte tenu du manque de contrôle des covariables dans la majorité des études, il semble prématuré pour les auteurs, de conclure que les observations de risque reflètent une réelle association avec les perturbations des cycles nycthémeraux (Erren *et al.* 2008).

Le dernier rapport d'ESCAPE rapporté par Hammer, Blettner et Zeeb (2009) et inclus dans la revue de Krstev et Knutsson (2019), présentant les résultats des 10 pays, montrait un léger excès du risque global de mortalité dû au cancer de la prostate (SMR = 1,09 ; IC à 95 % = 0,35-2,68) mais plus prononcé chez les pilotes quand était réalisée une analyse séparée des pilotes et du personnel masculin de cabine (SMR = 1,23 ; 95 % IC = 0,98-1,53). Hammer *et al.* ont émis l'hypothèse que les différences de risque de cancer de la prostate entre les pilotes et le personnel de cabine pourraient être dues à des différences dans les habitudes de sommeil et à l'exposition à la lumière. Pour les auteurs, les preuves suggèrent que l'association entre le métier de pilotes et le cancer de la prostate est possible.

En synthèse, s'il semble exister une augmentation de l'incidence du cancer de la prostate chez les pilotes et à un moindre degré chez le personnel masculin en cabine, l'hétérogénéité des études, aussi bien sur les périodes de ces travaux que sur les moyens diagnostiques de mise en évidence, ne permet pas de conclure à un lien entre les métiers de navigants et le risque de ce cancer.

4.3.1.2.4 Cancers des testicules

En 2010, Yousif *et al.* de l'équipe de l'Université de Mainz en Allemagne, ont réalisé une revue de la littérature internationale pour étudier une éventuelle relation entre l'exposition aux

rayonnements ionisants et non ionisants en milieu professionnel et le risque de développement d'un cancer des testicules sur la base d'une revue systématique de la littérature allant du 1^{er} janvier 1990 au 31 août 2008 (Yousif *et al.* 2010). Il y avait un total de 31 articles étudiant les effets des rayonnements ionisants sur le cancer des testicules. Seules sept études concernaient le personnel navigant. Parmi ces sept publications, celles de qualité suffisante retrouvent une augmentation non significative de l'incidence et de la mortalité par cancer des testicules. Seule une étude considérée comme de faible qualité du fait des difficultés de contrôle de la qualité, de la fiabilité et de l'exhaustivité des données signalées par Yousif ainsi que de l'absence des contrôles de qualité sur les données diagnostiques, démographiques et de vol, retrouve un OR pour le cancer des testicules associé à une ou plusieurs heures de vol de 1,72 (IC à 95 % 1,03-2,88). Une association entre l'exposition professionnelle aux rayonnements ionisants et le développement d'un cancer des testicules semble peu probable. Les risques associés aux doses d'exposition interne doivent encore être évalués, car les quelques études contenant des détails sur l'exposition interne ont rapporté un risque quelque peu accru de cancer des testicules.

A ce jour, il n'est pas retrouvé d'augmentation significative du cancer des testicules chez les navigants ni de lien avec les rayonnements subis. A noter que peu d'études ont été réalisées sur les cancers des testicules chez les personnels navigants.

4.3.1.2.5 Cancers colo-rectaux

En lien avec l'exposition au rayonnement cosmique, les pilotes de ligne sont suspectés d'avoir une incidence augmentée de cancers colorectaux. Les analyses chromosomiques ont montré un nombre significativement plus élevé de translocations chromosomiques chez les pilotes que chez les témoins, et la fréquence des translocations chromosomiques s'est avérée significativement associée au nombre d'années de vol (Nicholas, Swearingen et Kilmer 2009; Yong *et al.* 2014 cités par Moshkowitz *et al.* 2014). Cependant Ballard en 2000 dans sa revue de la littérature ne retrouvait pas d'excès de mortalité en lien avec ce cancer (Ballard *et al.* 2000).

En 2014, Moshkowitz et son équipe ont effectué une étude de l'incidence du cancer colo-rectal chez 270 pilotes masculins israéliens, civils et militaires et 1150 témoins (Moshkowitz *et al.* 2014), d'âge moyen identique. La prévalence des néoplasmes colorectaux était de 15,9 % chez les pilotes et de 20,6 % chez les témoins ($P = 0,097$). Il y avait significativement plus de polypes hyperplasiques chez les pilotes (15,5 % vs 9,4 %, $P = 0,004$) et une tendance à moins d'adénomes (14,8 % vs 20,3 % $P = 0,06$). La prévalence des lésions avancées chez les pilotes et les groupes témoins était de 5,9 % et 4,7 %, respectivement ($P = 0,49$), et la prévalence du cancer était de 0,7 % et 0,69 %, respectivement ($P = 0,93$). Les auteurs concluent à une prévalence plus faible d'adénomes colorectaux, d'adénomes avancés et de cancers, mais à une prévalence de polypes hyperplasiques plus élevée chez les pilotes que dans la population générale. Ils en concluent que les rayonnements ionisants ne constituent pas un facteur de risque de cancer colorectal chez le personnel navigant et que le fait d'éviter le tabagisme et la consommation excessive d'alcool, la prévention de la prise de poids et le maintien d'un niveau raisonnable d'activité physique sont associés à des risques nettement plus faibles de cancer colorectal. La surveillance systématique de l'état de santé des membres d'équipage contribue aussi vraisemblablement à réduire les facteurs de risque.

Dreger *et al.* (2020) ont publié une mise à jour des résultats d'une étude de suivi d'une des cohortes les plus importante. Pour les cancers liés aux rayonnements ionisants, dont les

cancers colo-rectaux, le RR était significativement augmenté dans la catégorie de dose de 15 à 25 mSv (RR 2,76, IC à 95 % 1,37 à 6,03). Les RR parmi les femmes membres d'équipage de cabine n'étaient pas significativement différents de la catégorie de référence, mais il y avait une tendance négative avec l'augmentation des niveaux de dose pour le cancer du côlon ($p = 0,08$).

Au total, si le nombre de translocations chromosomiques est augmenté chez les pilotes par rapport à la population générale, seule une prévalence supérieure des polypes hyperplasiques a été mise en évidence, mais pas des tumeurs colo-rectales.

4.3.1.2.6 Cancers des tissus hématopoïétiques

Parmi les études recensées par Ballard *et al.* (2000), une seule des études de cohorte de pilotes a révélé un risque accru de leucémies myéloïdes chroniques et myéloïdes aiguës. En revanche, la mortalité était abaissée dans deux publications.

Comme pour les pilotes, l'incidence des lymphomes non-hodgkiniens est augmentée mais de façon non significative par rapport à la population générale dans la revue réalisée par Tokumaru *et al.* en 2006 car seules 3 études avaient été retrouvées par les chercheurs.

Dans la revue de Copeland *et al.* (2011), les auteurs concluent que l'incidence des leucémies est plus élevée, de manière significative, chez les personnels navigants dans plus d'une des études examinées, et n'est pas moins élevée (de manière significative ou non) dans aucune des études revues. Les auteurs soulignent que les rayonnements ionisants sont un facteur de risque connu pour les leucémies chroniques et myéloïdes et que l'exposition à des champs électromagnétiques (50-60 Hz) pourrait être un facteur de risque supplémentaire pour les leucémies myéloïdes aiguës.

Un OR de 1,66 pour 10 mSv d'exposition a été observé pour la leucémie lymphoïde aiguë dans une étude de cohorte de quatre pays nordiques publiée par (Gudmundsdottir, Hrafnkelsson et Rafnsson 2017) dans le Lancet en 1999, mais seulement basée sur neuf cas, les résultats n'étaient pas statistiquement significatifs. Le SIR pour la leucémie myéloïde aiguë (LAM) était de 1,83 basé sur six cas observés et donc également non significatif.

En 2019, W. Lee, Kang et Yoon en Corée, ont montré des risques accrus statistiquement significatifs de leucémie incidente chez les travailleurs masculins de l'industrie du transport aérien par rapport aux groupes de référence après ajustement sur l'âge. Bien que les travailleuses de l'industrie du transport aérien aient également présenté des ratios de leucémie incidente élevés par rapport aux groupes de référence, ceux-ci n'étaient pas statistiquement significatifs. Les travailleurs masculins et féminins présentaient des ratios statistiquement plus élevés d'incidence d'autres cancers en particulier multisites par rapport à leurs groupes de référence respectifs (W. Lee, Kang et Yoon 2019). Dans cette étude, la limitation importante est qu'il existe de nombreux postes professionnels différents sous l'intitulé « ouvriers de l'industrie du transport aérien », notamment le personnel de cabine, le personnel de pilotage, les agents de contrôle du transport aérien, le personnel de maintenance des aéronefs et le personnel au sol. Ainsi, les travailleurs de l'industrie du transport aérien sont exposés à différents facteurs de risque selon leur position professionnelle. En agrégeant ces différents

postes en un seul groupe « exposé », les risques potentiels liés aux conditions de travail dans le secteur du transport aérien sont susceptibles d'avoir été sous-estimés.

Dreger *et al.* (2020) ont publié une mise à jour des résultats d'une étude de suivi d'une des cohortes les plus importantes. Pour les cancers liés aux rayonnements ionisants, dont les leucémies, le RR était significativement augmenté dans la catégorie de dose cumulée de 15 à 25 mSv (RR 2,76, IC à 95 % 1,37 à 6,03).

En conclusion, les leucémies sont un type de cancer dont le lien avec les rayonnements ionisants est avéré (IARC 2012). Plusieurs études ont rapporté une incidence plus élevée de leucémies chez les personnels navigants, mais ces résultats n'étaient pas toujours significatifs. Les données analysées ne permettent pas de conclure à une augmentation significative des cancers hématopoïétiques chez les personnels navigants en raison du nombre relativement faible de cas. Une suppression ou une perte accrue du chromosome 7 a été observée chez des patients atteints de myélodysplasie et de leucémie myéloïde aiguë (LAM) dans des cohortes comprenant des équipages.

4.3.1.2.7 Cancers de la thyroïde

La méta-analyse de Tokumaru en 2006 portant sur le PNC féminin retrouvait une incidence abaissée de cancer de la thyroïde à partir de 4 études de cohorte (RRc = 0,94 ; 95% IC : 0,50-1,76) (Tokumaru *et al.* 2006).

Pinkerton *et al.* en 2018 ne montre pas d'excès de cancer de la thyroïde sauf chez les femmes afro-américaines et les femmes nullipares (Pinkerton *et al.* 2018) dans la cohorte de personnels navigants américains par comparaison avec la population générale et en utilisant les paramètres d'exposition cumulée. La revue de la littérature internationale de Liu *et al.* (2018) n'a pas mis en évidence que les équipages des compagnies aériennes présentaient un risque significativement élevé d'incidence ou de mortalité par cancer de la thyroïde par rapport à la population générale. La faible augmentation du risque avec les doses absorbées et les fuseaux traversés peut s'expliquer par le petit nombre de cas observés et le potentiel biais de rappel de cette enquête faite par questionnaires.

Dreger *et al.* (2020) ont publié une mise à jour des résultats d'une étude de suivi d'une des cohortes les plus importantes composées des personnels navigants de compagnies allemandes. Pour les cancers liés aux rayonnements ionisants, dont le cancer de la thyroïde, le RR était significativement augmenté dans la catégorie de dose de 15 à 25 mSv (RR 2,76, IC à 95 % 1,37 à 6,03).

En conclusion, les études à ce jour ne montrent pas une augmentation significative de l'incidence ou de la mortalité des cancers thyroïdiens chez les PNC.

4.3.1.2.8 Cancers du cerveau

Ballard *et al.* (2000) a retrouvé dans sa méta-analyse une incidence augmentée des tumeurs malignes cérébrales chez les pilotes masculins, même après ajustement sur le SSE et

correction pour tenir compte de l'hétérogénéité entre les études. Le risque attribuable à la profession de pilote était de 31 % pour la mortalité et de 43 % pour l'incidence.

Cette hétérogénéité se retrouve également dans la publication de Haldorsen, Reitan et Tveten (2000) chez les pilotes norvégiens : son étude avec 9 cas, contre les 8,0 attendus, représente un résultat intermédiaire entre 7 versus 4,57 dans l'étude réalisée auparavant chez les pilotes d'Air Canada et 13 versus 18,3 dans l'étude de l'US Air Force.

Le lien possible des tumeurs cérébrales avec l'exposition aux rayonnements ionisants est évoqué par Dreger dans une étude réalisée en 2020 chez les pilotes et les PNC de deux compagnies allemandes : les décès par cancer du cerveau étaient élevés chez les hommes du poste de pilotage et les femmes de l'équipage de cabine (Dreger *et al.* 2020). La mortalité était nettement plus élevée par rapport aux résultats de l'étude de la même cohorte publiés antérieurement par Hammer (Hammer *et al.* 2014). Les auteurs de l'étude supposent que les champs électromagnétiques (CEM) peuvent être associés au cancer du cerveau chez le personnel navigant, mais en l'absence d'autres études que celle de l'US Air Force, ils ne peuvent conclure.

En conclusion, le faible nombre d'études ne permet de conclure sur le lien éventuel entre les métiers de navigants et les tumeurs cérébrales mais une attention particulière devra être portée sur la possibilité que les expositions aux CEM puissent expliquer une incidence augmentée des tumeurs du cerveau.

4.3.1.2.9 Conclusions

Les publications réalisées chez les pilotes d'avion de lignes commerciales et les personnels navigants commerciaux, confirment une incidence plus basse de certains cancers que dans la population générale, en particulier pour ce qui concerne les cancers broncho-pulmonaires, ceux de la vessie, du rein, du colon, du cerveau ou de la bouche (Ballard *et al.* 2000; Copeland *et al.* 2011; W. Lee, Kang et Yoon 2019). Beaucoup de publications en revanche concernent une augmentation de survenue de certains cancers possiblement en lien avec l'activité professionnelle, en particulier les cancers de la peau (mélanomes, épidermoïdes ou cancers basocellulaires), des organes hormonosensibles (sein, prostate en particulier) et les leucémies.

Chez les pilotes, par comparaison de populations de même catégorie socio-professionnelle, plusieurs études retrouvent une incidence augmentée des cancers cutanés et des tumeurs cérébrales. En revanche, il est retrouvé une baisse de la mortalité pour les cancers toutes causes confondues (Ballard *et al.* 2000; Zeeb *et al.* 2003; Blettner *et al.* 2003), mais une augmentation pour les mélanomes (Blettner *et al.* 2003; Zeeb *et al.* 2003).

Comme pour les pilotes, la mortalité des PNC par cancer, toutes causes confondues est plus basse que dans la population générale (Ballard *et al.* 2000).

Le rôle du tabagisme passif lorsque fumer était encore autorisé à bord des avions, a pu être étudié par McNeely (McNeely *et al.* 2019). Les OR pour les associations entre une année d'exposition aux fumées de tabac secondaires (FTS) chez les non-fumeurs ne retrouvent aucune preuve d'associations positives entre les FTS et tous cancers (parmi cancer du sein, de l'utérus, de la peau (dont mélanome), thyroïde ou encore cervical) et l'exposition aux FTS était négativement liée au carcinome épidermoïde (OR = 0,93, IC à 95 % : 0,86, 0,99). Dans la publication de Dreger *et al.* (2020), les auteurs constatent un faible nombre de décès par

cancer liés au tabagisme (principalement le cancer du poumon), en particulier parmi les membres d'équipage de cabine. De plus, la mortalité par cancer liée à l'alcool (y compris de la cavité buccale, du pharynx, de l'œsophage, du foie et du larynx) était inférieure à l'unité dans tous les groupes, y compris pour le personnel navigant masculin. Dans cette étude, les RR parmi les femmes membres d'équipage de cabine n'étaient pas significativement différents de la catégorie de référence. Une mortalité inférieure à celle de la population générale a été constatée pour toutes les causes, tous les cancers, les cancers solides ainsi que pour les cancers radio-induits et non radio-liés dans tous les groupes professionnels. Dans l'ensemble, la mortalité dans cette étude était plus faible pour la plupart des types de cancer. Les expositions cumulées ont sensiblement augmenté parallèlement au vieillissement de la cohorte ; cependant, il y avait très peu de preuves d'associations dose-réponse pour les types de cancer considérés.

Di Trollo en 2015 publie une revue systématique qui concerne les lésions chromosomiques, à partir de MEDLINE en utilisant les mots-clés « rayonnement cosmique », « cancer », « anomalies chromosomiques », chez les pilotes et les personnels de bord, mais aussi chez les astronautes (Di Trollo *et al.* 2015). Les auteurs concluent que si les études retrouvent bien un grand nombre d'aberrations chez ces astronautes, le spectre des radiations est différent de celui auquel sont exposés les pilotes des avions. En ce qui concerne les études épidémiologiques chez les personnels à bord, les auteurs concluent que, malgré toutes les études et les méta-analyses réalisées, il ne leur est pas possible de mettre en évidence de façon irréfutable un lien entre ces expositions et une augmentation de l'incidence de certains cancers.

En conclusion, les données identifiées sur le risque de cancers mettent en évidence :

- une augmentation de l'incidence des cancers de la peau dont les mélanomes, mais le rôle des UV et rayonnement cosmique ne peut être confirmé et une diminution de la mortalité a également été observée. L'hypothèse d'examens médicaux fréquents permettant un dépistage plus précoce est avancée ainsi que le biais du travailleur sain.
- une augmentation de l'incidence et de la mortalité des tumeurs cérébrales mais pas de lien mis en évidence avec l'exposition au rayonnement cosmique pouvant expliquer cette augmentation.
- une légère augmentation de l'incidence des cancers de la prostate chez les pilotes, essentiellement de genre masculin, mais la mortalité n'est pas augmentée de façon significative. Le risque de cancer prostatique chez les PNC masculins n'est pas augmenté. Le rôle du travail de nuit et des perturbations du cycle nyctéméral est possible mais pas formellement prouvé. Une augmentation non significative de l'incidence et de la mortalité des tumeurs testiculaires a été observée mais très peu d'études spécifiques sur ce sujet.
- une augmentation de l'incidence du cancer du sein chez les PNC avec un rôle de la parité chez les hôtesses de l'air les plus anciennes et une mortalité comparable à celle de la population générale. Il n'est pas observé de lien avec le tabagisme passif avant l'interdiction de fumer à bord. De possible biais liés à une fréquence accrue des examens médicaux sont rapportés.
- une prévalence plus faible d'adénomes colorectaux, d'adénomes avancés et de cancers colorectaux, mais une prévalence de polypes hyperplasiques plus élevée chez les pilotes que dans la population générale.

- une absence d'augmentation des cancers de la thyroïde.

Le rôle du rayonnement cosmique dans la survenue des cancers reste possible, en particulier pour les vols ayant lieu au-dessus des latitudes élevées plus proches des pôles.

4.3.2 Santé cardiovasculaire

Les maladies cardiovasculaires représentent un problème majeur de santé publique en population générale. Il s'agit de la première cause de mortalité dans le monde, de la seconde en France, et ces maladies multifactorielles communes sont la résultante de facteurs de risque constitutionnels tels que l'âge, le sexe, les antécédents familiaux et de facteurs de risque liés au mode de vie tels que l'exposition au tabac ou à l'alcool, l'alimentation, la sédentarité ou le stress.

Il existe donc des variations de mortalité et de morbidité cardiovasculaires selon les caractéristiques des populations étudiées. Plusieurs études spécifiques au personnel navigant ont été menées ces dernières années afin de déterminer si cette population était soumise à un sur-risque cardiovasculaire.

L'augmentation du risque de thrombose veineuse notamment est évoquée depuis les années 50 mais aucune donnée n'est à ce jour venue étayer une association spécifique aux voyages en avion. En 2002, Jacobson *et al.* publiaient une étude portant sur 27 membres d'équipage de compagnies aériennes sud-africaines effectuant au moins deux vols courts intra-nationaux par jour (entre 3 et 10h) sans faire la preuve d'événements thrombotiques subcliniques. Les auteurs suggéraient d'étendre les investigations à l'aviation longue distance avec et sans changement de fuseau horaire. Adi *et al.* (2004) et Kuipers *et al.* (2007) ont mené des revues systématiques de la littérature qui ont montré que les voyages longue distance augmentaient bien le risque de thrombose (par un facteur 2 à 4 selon la revue systématique de Kuipers *et al.* (2007)) mais qu'aucun mode de transport spécifique n'avait été mis en cause. Adi *et al.* (2004) proposaient de limiter les futures études aux très longs courriers et aux voyageurs fréquents afin d'écartier le sur-risque spécifique aux voyages en avions. Kuipers *et al.* (2007) soulignaient quant à eux qu'une étude sur les changements de paramètres du système de coagulation chez des volontaires identifiée dans leur revue systématique de 2007 a semblé identifier un mécanisme supplémentaire lié à l'immobilisation qui pourrait conduire à l'activation de la coagulation après un voyage aérien, tout en rappelant le manque d'études sur le mécanisme responsable du risque accru de thrombose veineuse après un voyage (aérien).

En 2014, Kuipers *et al.* ont mené une étude de cohorte chez 2630 pilotes de la Dutch aviation society qui n'a pas permis d'observer une incidence plus élevée des thromboses veineuses par rapport à la population générale.

Des études sur la santé globale du personnel navigant ont également été menées et n'ont en général pas permis de montrer une survenue ou une mortalité accrue de maladies cardiovasculaires à l'exception de l'étude transversale menée par McNeely *et al.* (2014) qui faisait état de prévalence de ces maladies 3,5 fois supérieure à la population générale chez des femmes américaines exerçant le métier d'hôtesse de l'air.

De même, une étude récente de McNeely *et al.* (2019) réalisée sur un grand échantillon de personnels navigants commerciaux Américains n'ayant jamais fumé (n=3015) a mis en évidence une association positive entre tabagisme passif d'origine professionnelle chez les PNC et l'infarctus du myocarde, l'artériopathie et les épisodes répétés de pneumopathie. L'échantillon a été divisé en deux groupes : l'un exposé au tabagisme passif (n=1294) et l'autre non exposé au tabagisme passif (n=1721). Ren *et al.* 2008 ont réalisé une étude sur un échantillon de 130 personnels navigants non-fumeurs exposés pendant plus de 5 ans au tabagisme passif dans leur contexte professionnel (au moins 1000 heures par an). Cette étude a retrouvé une association positive avec l'hypertension artérielle mais pas avec une éventuelle altération de l'hémodynamique pulmonaire.

Auparavant, l'étude de Cashman *et al.* (2007) avait notamment montré que le taux standardisé de mortalité (SMR) des pilotes de la compagnie ALPA (selon leurs données de santé de 1980 à 2002) diminuait significativement pour les maladies cérébrovasculaires, les infarctus du myocarde et les cardiopathies ischémiques chroniques. Les auteurs constataient une mortalité globale inférieure chez les pilotes par rapport à la population générale américaine. Stavola *et al.* (2012) et Sykes *et al.* (2012) ont montré lors de leurs études prospective et transversale respectives un phénomène similaire : un SMR significativement diminué dans une population de personnels navigants britannique en comparaison à la population générale tandis qu'ils n'en constataient pas en comparaison à une population de contrôleurs aériens pour Stavola *et al.* (2012) et une meilleure santé cardiovasculaire pour une population de pilotes néo-zélandais par rapport à la population générale pour Sykes *et al.* (2012).

Ceci a été confirmé par une revue systématique récente de la littérature par Aragón-Vela *et al.* (2020) sur les groupes de travailleurs, dont le personnel navigant, soumis à une exposition intermittente chronique à l'hypoxie. Cette étude montrait que la mortalité par maladie cardiovasculaire du personnel navigant était inférieure à la moyenne contrairement aux mineurs et soldats exposés à une hypoxie intermittente, mettant en exergue l'importance du statut socio-économique et du mode de vie.

Les horaires de travail prolongés et les temps de récupération limités des membres d'équipage des compagnies aériennes peuvent entraîner des tensions cardiovasculaires. Goffeng *et al.* (2019) ont évalué les changements dans la variabilité du rythme cardiaque de 49 membres d'équipage sur 4 jours de travail consécutifs de plus de 39 heures et ont confirmé cette augmentation de la tension cardiaque, modulée par les caractéristiques du travail effectué, les pauses et le sommeil.

En conclusion, la survenue des maladies cardiovasculaires chez le personnel navigant semble donc associée à des facteurs de risque déjà en cause en population générale. En effet, bien que la majorité des comparaisons entre groupes de population soient indirectes dans la littérature, avec des données collectées dans des conditions et avec des finalités différentes, les variations observées semblent généralement être la résultante d'une part des exigences quant à l'aptitude médicale des personnels navigants (biais du travailleur sain) et d'autre part du mode de vie non spécifique à la profession (immobilisation prolongée, tabagisme passif antérieur, alimentation, stress, ...) mais délétères en ce qui concerne la santé cardiovasculaire.

4.3.3 Santé respiratoire

Le taux d'humidité est nettement plus bas qu'au niveau de la mer dans les cabines d'avion, généralement autour de 10 % (N. L. Nagda 2001). Cela est à l'origine d'un dessèchement des muqueuses, tels que l'arbre respiratoire et le nez, mais également de la peau et des conjonctives (œil) dont il a été démontré qu'il peut altérer le confort des passagers et des personnels de cabine en étant source d'irritation (Rayman 1997).

Sur le plan respiratoire, ce dessèchement de la muqueuse bronchique peut-être source d'irritation ou majorer une inflammation sous-jacente, et peut être en ce sens plus inconfortable chez les sujets qui présentent une infection respiratoire en cours, un asthme ou une trachéotomie (Rayman 1997). Il a pu être démontré que la diminution de l'humidité de l'air est capable de réduire la clairance muco-ciliaire et l'activité phagocytaire dans le système respiratoire par augmentation de la concentration du mucus (Berglund 1998). Ces signes cessent à l'arrêt de l'exposition et aucun effet à moyen et long terme n'a été identifié.

Une étude de 2014 basée sur l'exploitation de questionnaires de santé réalisés chez plus de 4000 personnels navigants commerciaux de deux compagnies aériennes américaines en 2007 a pu observer une prévalence de la bronchite chronique trois fois plus élevée que dans la population générale alors que le tabagisme était moins important chez les PNC et tandis que les prévalences d'allergies ou d'asthme étaient similaires (McNeely *et al.* 2014). Au final, l'étude a pu montrer le lien positif entre certaines affections comme la bronchite chronique et la durée professionnelle du personnel navigant.

Une étude publiée en 2003 a évalué les symptômes déclarés par interview de personnels navigants commerciaux féminins Américains (n=1824) et les a comparées à un échantillon aussi féminin de professeurs des écoles (n=331), ainsi qu'à la population générale (Whelan *et al.* 2003). Les personnels navigants et les enseignants ont présenté une prévalence plus élevée des symptômes associés au travail : irritatifs oculaires (12,4 % et 7,4 %, respectivement), nasaux (15,7 % et 8,1 %) et irritation de la gorge (7,5 % et 5,7 %) que les autres femmes dans d'autres contextes professionnels (2,9 % de symptômes oculaires, 2,7 % nasaux et 1,3 % de symptômes pharyngés).

Les conséquences à long terme de l'exposition au tabagisme passif ont été peu étudiées. La fonction respiratoire de 61 personnels navigants non-fumeurs et exposés au tabagisme passif dans les cabines, a pu être étudiée (Arjomandi *et al.* 2009). Une discrète altération des échanges gazeux (diminution de la capacité de diffusion pulmonaire pour le monoxyde de carbone) et un aspect concave vers le haut de la boucle-débit volume, en faveur d'une légère obstruction des voies aériennes périphériques, ont été montrés.

Une étude récente, réalisée sur un grand échantillon de personnels navigants commerciaux américains n'ayant jamais fumé (n=3015) n'a mis en évidence aucune association entre tabagisme passif d'origine professionnelle chez les PNC et asthme, bronchite, sinusite (McNeely *et al.* 2019). L'échantillon a été divisé en deux groupes : l'un exposé au tabagisme passif (n=1294) et l'autre non exposé au tabagisme passif (n=1721). Une autre étude a comparé la prévalence des maladies respiratoires dans cette catégorie professionnelle par rapport à la population générale contemporaine sur un échantillon plus restreint de 362 personnels navigants américains qui ont renseigné un questionnaire en ligne visant à préciser leur expérience professionnelle, leurs antécédents médicaux, leur tabagisme personnel et leur

exposition au tabagisme passif durant leur activité professionnelle (Beatty, Haight et Redberg 2011). Au total, les personnels navigants ont présenté une prévalence augmentée de bronchite chronique (11,7 % contre 7,2 %, $p < 0,05$), emphysème/bronchopneumopathie chronique obstructive (BPCO) (3,2 % contre 0,9 %, $p < 0,03$) et sinusite (31,5 % contre 20,9 %, $p < 0,002$), malgré une prévalence plus faible, d'autres pathologies telles que l'hypertension artérielle, le diabète, un taux de cholestérol élevé, une insuffisance cardiaque, une maladie cancéreuse et affection de la thyroïde. Parmi les agents de bord qui ont déclaré n'avoir jamais fumé, il n'y avait pas d'association significative entre les années de service en tant que personnel navigant avant l'interdiction de fumer et les maladies sus-citées. Cependant, dans ce même groupe, il y avait un risque significativement accru de symptômes quotidiens parmi congestion nasale, irritation de la gorge ou des yeux par augmentation de 10 ans d'années de service en tant que personnel navigant avant l'interdiction de fumer (OR=2,14, IC à 95 % 1,41 - 3,24). Une autre étude portant sur 2053 personnels navigants exposés au tabagisme passif a pu démontrer un lien entre la durée d'exposition au tabagisme passif lors des vols et la fréquence des épisodes de sinusite, les infections de l'oreille moyenne et l'asthme (Ebbert *et al.* 2007). Une étude publiée en 2015 a cherché à évaluer les effets de l'interdiction de fumer dans les avions (arrêt du tabagisme passif) sur les symptômes déclarés dans une cohorte de pilotes suivis pendant trois années (1997-2000) (Fu, Lindgren et Norbäck 2015). Les principaux symptômes allégués par les pilotes étaient par ordre de fréquence : nasaux (39,9 %), oculaires (38,5 %), fatigue (30 %) et ont diminué lors de l'arrêt de l'exposition au tabagisme passif.

En conclusion, si une majoration de la prévalence de certaines maladies respiratoires a pu être mise en évidence chez le personnel navigant, le facteur confondant du tabagisme passif en vol qui a été réglementairement supprimé en France en 2007 et très volontairement réduit dans beaucoup de compagnies aériennes dès les années 1990-2000 doit être interrogé, en particulier dans la part de sa responsabilité dans ces augmentations de prévalence.

Au total, si les effets à long terme du tabagisme passif lié aux années d'exposition lorsque le tabagisme actif était encore autorisé durant le vol, sont de nature à majorer les maladies respiratoires chez le personnel navigant (bronchite chronique en particulier), les effets respiratoires après l'interdiction du tabac dans les cabines d'avion ne sont quasiment pas documentés ou lorsqu'ils le sont, ils apparaissent négligeables et restent limités à des signes aigus sans conséquence à long terme.

4.3.4 Reproduction féminine

Sont concernés ici les effets sur les organes reproducteurs, le système hormonal correspondant ou la conception de l'enfant, résultant d'une exposition à n'importe quel moment de la vie de l'individu féminin.

Les manifestations majeures de cette toxicité comprennent les effets sur l'initiation et le déroulement de la puberté et de la maturation sexuelle, sur la production et le transport des ovules, le cycle menstruel, le comportement sexuel (libido...), la fertilité (la fertilité est la capacité biologique déterminée par les items précédents), la gestation, la parturition, la lactation, l'activité hormonale ou la réponse physiologique qui perturberait la capacité de fécondation, la fécondation elle-même ou le développement de l'ovule fécondé jusqu'à, et y

compris, l'implantation, une ménopause prématurée ou une modification des fonctions de la progéniture dépendant de l'intégrité du système reproductif féminin.

Les troubles identifiés et étudiés dans la littérature concernent les troubles menstruels, l'érosion cervicale, la prolactinémie, les fausses couches, et maternités avant terme.

Quatre études de morbidité chez les PNC (Grajewski *et al.* 2015; Heidecker *et al.* 2017; Radowicka, Pietrzak et Wielgoś 2013, 2021) ont été identifiées dans la littérature, ainsi que deux revues (Magann *et al.* 2010; Copeland *et al.* 2011).

Les PNC seraient plus sensibles aux fausses couches ($p=0,002$) selon l'étude d'Heidecker *et al.* (2017) qui regroupait 145 PNC volants avant l'interdiction de la cigarette dans les avions. Il a été mesuré 26 % de fausses couches, en comparaison aux 17,1 % de la population générale (données 2010 du *Centers for Disease Control and Prevention* (CDCP)). En revanche, il n'a pas été relevé d'effet du tabagisme passif ($p=0,93$).

En 2015, Grajewski *et al.*, dans une étude de cas (questionnaire) comparant 673 femmes PNC et 91 institutrices, n'ont pas relevé d'augmentation du risque de fausses couches (Grajewski *et al.* 2015). Les fausses couches chez les PNC (non significativement supérieures à la population de référence) seraient associées au travail durant les heures de sommeil, et à un travail physiquement exigeant, et pourraient être liées à l'exposition au rayonnement cosmique. Il faut noter que la dernière étude comprend un effectif supérieur (673 personnes) par rapport à Heidecker *et al.* (2017) (145 personnes), et un groupe contrôle.

Dans une revue de la littérature, Magann *et al.* (2010) a noté un risque d'avortement spontané plus élevé chez les hôtesses de l'air que chez les témoins (OR = 1,62, intervalle de confiance à 95 % [IC] : 1.29, 2.04). Dans une méta-analyse, Magann *et al.*, ont identifié que le risque de naissance prématurée (inférieur à 37 semaines) serait aussi plus important chez les passagers que chez les témoins (métaOR = 1,44, IC à 95 % : 1,07- 1,93). Cependant dans cette même méta-analyse, le risque de prééclampsie (OR=0,86, IC à 95 % : 0,58, 1,27), d'admissions dans une unité de soins intensifs néonataux (OR=1,19, IC à 95 % : 0,78- 1,82), ou de poids de naissance inférieur au 10^{ème} percentile (OR=1,25, IC 95 % : 0,62- 2,48) n'a pas augmenté. Les hôtesses de l'air ne présentaient pas un risque accru de naissance prématurée par rapport aux témoins (OR=1,37, IC à 95 % : 0,85- 2,22) ou d'accoucher d'un enfant dont le poids à la naissance était inférieur au 10^e percentile (OR=1,57, IC à 95 % : 0,68- 3,74). Les risques d'avortements spontanés et d'autres issues défavorables de la grossesse ont été peu étudiés dans un nombre limité d'enquêtes.

Les auteurs de la revue pointent la faiblesse de la qualité méthodologique des études.

Dans une autre revue Copeland *et al.* (2011), citant l'étude de Vaughan, Daling et Starzyk (1984), il est mesuré un risque significatif de mortalité fœtal chez les personnels de vol comparé aux autres femmes en situation d'emploi ; de même dans l'étude de Daniell, Vaughan et Millies (1990) chez le personnel de vol comparé à un groupe contrôle de femmes avec ou sans emploi, mais non significatif comparé au groupe femmes avec emploi. En revanche, pour Irgens *et al.* (2003) il n'y aurait pas d'augmentation de mort périnatale, petit poids à la naissance, naissance avant terme, et malformations à la naissance sur des pilotes et personnels de vol norvégiens.

La survenue de troubles menstruels, du sommeil et d'une érosion cervicale serait liée à la spécificité du travail des personnels navigants, correspondant au travail posté, selon une étude menée en Pologne sur 43 PNC (Radowicka, Pietrzak et Wielgoś 2013).

L'hyperprolactinémie serait plus fréquente chez les agents de bord féminins (46 %) que dans la population générale (9 %) ($p < 0,001$), mais rarement accompagnée de signes cliniques. La fréquence des vols et la durée du service n'affectent statistiquement pas le développement de l'hyperprolactinémie ni la concentration moyenne de prolactine (Radowicka, Pietrzak et Wielgoś 2021). Ces études avaient un faible effectif ($N=43$), les résultats sont donc à prendre avec précaution.

En conclusion, le risque d'avortement spontané semblerait significatif chez les PNC d'après les résultats rapportés dans certaines études, cependant d'autres études observent des résultats contradictoires. En ce qui concerne les naissances avant terme (<37 semaines), l'augmentation du risque serait significative chez les passagers. Il n'y aurait pas de risque accru de naissance prématurée ou d'accoucher d'un enfant dont le poids serait inférieur au 10^{ème} percentile. L'hyperprolactinémie serait plus fréquente chez les PNC, mais sans signe clinique. Les maladies seraient plus liées au travail de nuit / décalé qu'au vol.

Il faut noter que les résultats des études sont contradictoires et souffrent d'une faible qualité, surtout due à de faibles effectifs inclus dans les études.

4.3.5 Troubles musculo-squelettiques

Les troubles musculo-squelettiques (TMS) sont des problèmes de santé communs avec des causes multifactorielles : ergonomiques (travaux physiques intenses, postures contraignantes, mouvements répétitifs, vibrations...), position assise dans des véhicules pendant de longues heures, travail répétitif, facteurs organisationnels, facteurs personnels (statut socio-économique, génétique...). Ils peuvent également être des facteurs de risques psychosociaux (Runeson-Broberg, Lindgren et Norbäck 2014).

Ils sont associés à la profession de personnel navigant commercial en lien avec différentes tâches telles que la manutention du chariot de repas/boisson lors du vol ou les différentes tâches nécessitant de travailler au-dessus de la hauteur des épaules (P.H. Chen, Liu, *et al.* 2021).

H. Lee *et al.* (2006) a conduit une étude sur la prévalence des TMS, dans les 12 derniers mois, chez les femmes PNC opérant sur des vols long-courrier (supérieurs à 6 heures) d'une compagnie aérienne américaine. L'âge moyen des répondantes était 54 ans ($SD=6,2$) avec une durée d'exercice de 30 années ou plus. En moyenne les PNC volaient 87 h/mois, avec une durée moyenne de 11 heures de vol par service. Les zones corporelles les plus touchées par des TMS sont la région lombaire, les poignets, le cou et les épaules. La moitié des PNC déclarant des TMS rapportent des symptômes fréquents (journaliers, hebdomadaires ou mensuels). Les chevilles, le haut du dos et les poignets sont les zones qui entraînent une fréquence des douleurs la plus importante avec plus d'un tiers des répondantes déclarant des symptômes presque quotidiens. En termes d'intensité, ce sont les zones des lombaires, des

poignets et des chevilles qui entraînent les douleurs les plus importantes. Les auteurs concluent que les TMS sont un problème de santé important chez les PNC féminin d'âge moyen travaillant sur des vols long-courrier. Les auteurs soulignent que l'auto-déclaration entraîne un biais, l'objectif était d'identifier les TMS en lien avec le travail, cependant, il n'est pas possible d'exclure des TMS en lien avec d'autres problèmes de santé, notamment en lien avec l'âge.

H. Lee *et al.* (2008) a étudié le lien entre les facteurs de risques psychosociaux et les TMS des lombaires chez les femmes PNC volant sur des long-courriers internationaux. L'âge moyen des répondantes était de 54 ans, avec une durée moyenne de travail de 31 ans en tant que PNC. Le nombre d'heures de vol moyen par mois étaient de 87,5, pour une durée moyenne de 11 heures par vol. 87 % des répondantes ont déclaré des douleurs dans les lombaires au moins une fois par mois. Plus de la moitié (61 %) ressent des symptômes pendant une semaine ou moins. En termes d'intensité, 71 % des répondantes déclarent des douleurs au moins modérées, et 24 % des douleurs sévères, voir qualifient la douleur comme étant la pire jamais ressentie. Les auteurs concluent que la prévalence des TMS dans la région lombaire est importante, en adéquation avec les autres études, supérieure à la prévalence chez les femmes américaines (16,7 %, 2002).

Prombumroong, Janwantanakul et Pensri (2011) s'est intéressé à la prévalence des douleurs lombaires (auto-déclarées) chez les PNT d'une compagnie aérienne thaïlandaise. Parmi les répondants, 55,7 % ont déclaré des douleurs lombaires dans les 12 derniers mois. L'analyse des facteurs associés montre un risque élevé de douleurs lombaires chez les PNT ayant subi occasionnellement ou fréquemment des turbulences au cours de l'année précédente, soulevant leurs bagages personnels 4 fois et plus par période de service, estimant que le bruit dans le cockpit était trop fort et percevant des risques professionnels à des niveaux intermédiaires ou élevés. Les facteurs qui réduisaient le risque de lombalgie étaient la pratique régulière d'un exercice physique intense et des pauses de 5 à 23 heures entre les vols.

Dans Runeson-Broberg, Lindgren et Norbäck (2014) la prévalence des TMS chez 354 pilotes suédois était plus importante que dans la population générale ; les symptômes les plus fréquents étaient des douleurs dans le bas du dos (55 %), le cou (40 %) et les épaules (44 %), cela peut être lié d'après les auteurs au travail sédentaire des pilotes ainsi qu'un stress psychosocial spécifique lié au travail. A noter qu'il n'a pas été observé d'influence significative entre la prévalence des TMS et la durée des vols, sauf pour les coudes où une prévalence plus faible a été observée pour les longs -courriers. Les TMS chez les pilotes peuvent être affectés par des facteurs psychosociaux tels que des exigences élevées et un faible soutien social, en particulier pour les copilotes (Runeson-Broberg, Lindgren et Norbäck 2014).

McNeely *et al.* (2014) a conduit une étude en 2007, sur plus de 4 000 PNC, dont 80 % de femmes, afin de comparer l'état de santé des PNC avec la population générale (cohorte NHANES). Plusieurs maladies sont investiguées, dont les TMS, mais de manière non-approfondie. Ainsi la publication rapporte les pourcentages de PNC rapportant certains TMS, mais sans comparaison avec la population générale ce qui rend l'interprétation des résultats difficile. Les auteurs soulignent que les douleurs musculaires sont rapportées par un tiers des répondants et soulignent le manque de données sur l'évolution des douleurs musculaires dans le temps avec l'augmentation des taux d'occupation des avions, la réduction de l'espace dans

la cabine, l'augmentation des bagages cabines, pour lesquels l'aide des PNC peut être sollicité pour les ranger dans les compartiments à bagage.

Dans une recherche menée par l'Institut du travail, de la sécurité et de la santé au travail, ministère du Ministère du travail à Taiwan, les TMS représentaient 46,8 % des maladies professionnelles (P.H. Chen, Liu, *et al.* 2021). Ainsi, P.H. Chen, Liu, *et al.* (2021) ont conduit une étude chez des femmes PNC pour investiguer six tâches communes en cabine : manutention des bagages « cabines », manutention du charriot, travaux de cuisine, services (boissons, repas, « *duty-free* »), contrôle de sécurité et diverses tâches (la position debout ou la marche pendant une longue période). Parmi les 88 PNC ayant répondu aux questionnaires, il est à noter que plus de la moitié des participantes avait moins de quatre années d'ancienneté et près de 80 % avaient moins de 30 ans. Les participantes ont dû classer les tâches en fonction de l'intensité de travail. La tâche la plus intense était la manutention des bagages « cabines », suivie de la manutention des chariots et des travaux de cuisine. Les douleurs aux épaules étaient les TMS les plus fréquemment rapportés (90 % dans la semaine précédente). Quarante-vingt pourcent des réponses ont rapporté des douleurs dans le cou, les lombaires, le poignet droit, le bas des jambes et pieds au moins une fois dans la semaine précédente. La majorité des troubles rapportés a été jugée faible, 20 % ont indiqué un niveau de gêne élevé pour les épaules, les lombaires, le bas des jambes et les pieds. Après ajustement multivarié avec contrôle de l'effet de l'âge, cette étude a trouvé une association marginale significative ($p=0,09$) entre l'ancienneté et la gêne à l'épaule droite pour les employées de moins de 25 ans, ainsi qu'entre la manutention des bagages « cabines » et la gêne au niveau des épaules.

Ihlebaek et Rustad (2022) a investigué les différences de prévalence des TMS chez les hommes et les femmes PNC dans les 30 jours précédents le remplissage du questionnaire (427 sujets). Il était demandé d'estimer la douleur sur six parties du corps. La majorité des répondants était des femmes et était âgée de 30 à 50 ans. Les résultats ne montrent pas de différences entre la prévalence des TMS chez les hommes et les femmes, à l'exception des douleurs dans les pieds rapportés par 46 % des femmes et 33 % des hommes ($p=0,020$). Les TMS les plus rapportés, par plus de la moitié des répondants, portent sur le cou, les épaules et les lombaires. Seuls 16 % des répondants n'ont rapporté aucune douleur durant les 30 derniers jours. 70 % des répondants ont rapporté des douleurs sur plusieurs zones du corps, ce qui est supérieur à la prévalence dans la population de travailleurs norvégiens (65 %). Les auteurs soulignent que ces résultats diffèrent d'autres études où des prévalences de TMS plus élevées sont observées chez les femmes. Les auteurs ont également recherché les liens entre les TMS et le stress psychosocial lié à l'emploi. L'expérience d'une situation très stressante au travail était significativement associée avec des douleurs dans le cou, les épaules, les bras, le haut et le bas du dos et des douleurs sur plusieurs zones, par rapport à une situation peu stressante. Une situation de travail passive (peu de demande et peu de contrôle) est significativement associée avec des douleurs dans le cou, le bas et le haut du dos et des douleurs sur plusieurs zones.

En conclusion, les études identifiées montrent des prévalences élevées de TMS chez le personnel navigant, peu ne déclarant aucun TMS. Ces études ont des limites, elles portent sur assez peu de sujets et sont uniquement basées sur de la déclaration sans objectivation médicale. Par ailleurs, pas ou peu de comparaisons sont faites par rapport à une autre

population, et certains auteurs soulignent qu'une origine autre que le travail pourrait être impliquée. Enfin, quelques études montrent une association entre les TMS et les troubles psycho-sociaux (TPS).

4.3.6 Troubles psychosociaux

L'institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles (INRS) souligne que l'exposition à des situations de travail, où sont présents des conditions de stress, de violence qui peuvent être induit par l'activité elle-même ou générés par l'organisation et les relations de travail, peut avoir des conséquences sur la santé des salariés, notamment en termes de maladies cardiovasculaires, de troubles musculo-squelettiques, de troubles anxio-dépressifs, d'épuisement professionnel, voire de suicide.

Dans une revue de la littérature de 2018, Pasha et Stokes ont analysé 20 études. Dans cette revue, la prévalence de la dépression chez les pilotes de ligne varie de 1,9 % à 12,6 %, ce qui est équivalent à celle en population générale. Les facteurs qui ont un impact négatif sur la santé mentale des pilotes comprennent la toxicomanie, la violence verbale ou sexuelle, la perturbation des rythmes circadiens du sommeil et la fatigue.

Jackson et Earl (2006) ont étudié 162 pilotes de courts courriers. La fatigue sévère a été signalée plus fréquemment par les pilotes de compagnies aériennes à bas prix que par les pilotes de compagnies aériennes régulières ($p = 0,05$) et les indices de fatigue étaient plus élevés dans ce groupe ($p = 0,03$). Cependant, les auteurs soulignent le fait que cette fatigue peut aussi être induite par la pratique du pilotage durant leur temps libre, qui n'a pas été mesurée.

Pour H. Lee *et al.* (2008), les agents de bord souffrant de troubles musculosquelettiques au niveau des vertèbres lombaires, comparés à ceux qui n'en souffraient pas, avaient une perception plus élevée des exigences psychologiques de leur travail, de l'insécurité de l'emploi et de la charge physique. Egalement, après contrôle de la charge physique et des facteurs personnels, une insécurité professionnelle élevée augmentait significativement le risque de troubles musculo-squelettiques liés au niveau des lombaires.

McNeely *et al.* (2014) a conduit une étude en 2007, sur plus de 4 000 PNC, dont 80 % de femmes, afin de comparer l'état de santé des PNC avec la population générale (cohorte NHANES). Plusieurs maladies sont investiguées, dont la fatigue, les troubles du sommeil et la dépression. Par rapport à la population générale, les PNC hommes et femmes ont une prévalence des troubles du sommeil diagnostiqués 3,7 et 5,7 plus élevée que la population générale (IC 95 : [3,22 – 4,15] et [5,27 – 5,95]), ajustée sur l'âge. La fatigue et la dépression étaient en environ deux fois plus élevées chez les femmes (1,83 ; IC95 [1,63 – 2,03] ; 2,18 IC95[1,77 – 2,58]). Chez les hommes la fatigue est 2,18 fois (IC95 [1,57 – 2,78]) plus élevée que dans la population générale, corrigée sur l'âge et la dépression 5,67 fois (IC95 [3,57 – 7,77]).

Ihlebak et Rustad (2022) a investigué les différences de prévalence du stress psychosocial lié à l'emploi chez les hommes et les femmes PNC (427 sujets). Les PNC devaient répondre à sept questions portant sur la quantité de travail, l'autonomie (*control*) et le soutien du superviseur le plus proche et des collègues. La majorité des répondants était des femmes et

était âgée de 30 à 50 ans. Les résultats ne montrent pas de différences significatives entre la prévalence du stress psychosocial lié à l'emploi chez les hommes et les femmes, 33 % vivent une situation professionnelle très stressante, 24 % peu stressante, 26 % une situation active et 17 % une situation passive⁹.

En conclusion, il y aurait une prévalence significativement plus importante de dépression chez les pilotes de ligne. Il faut ajouter que les fortes exigences du travail (physiques et psychologiques), le faible soutien social, les conditions de vol dégradées (turbulences), l'insécurité professionnelle auraient pour conséquence une augmentation des TMS.

Néanmoins, le très faible nombre d'études disponibles qui sont des études descriptives ne permettent pas de conclure sur le lien entre ces effets et la profession de personnels navigants.

4.3.7 Mortalité et morbidité toute cause

Une étude réalisée sur un très large échantillon de 16 327 personnels navigants et 3162 contrôleurs aériens anglais étudiés entre 1989 et 2006 a permis d'évaluer la mortalité dans ces deux catégories professionnelles et de la comparer à la population générale contemporaine appariée Stavola *et al.* (2012). Au total, 577 décès sont survenus au cours du suivi et par rapport à la population générale, les deux professions, personnels navigants et les contrôleurs aériens, ont présenté une baisse de la mortalité toutes causes, principalement due à des réductions marquées de la mortalité par cancer et par maladie cardiovasculaire, même si les personnels navigants ont présenté une mortalité plus élevée, due aux accidents d'avion. Il n'y avait pas de différence dans la mortalité toutes causes confondues, entre les deux groupes après ajustement sur les variables liées à la santé, à l'exception de ceux résultant d'accidents d'avion.

Une étude plus spécifiquement réalisée chez des pilotes de ligne Néo-Zélandais entre le 2009 et 2010 a confirmé une meilleure santé de ces professionnels par rapport à la population générale (Sykes *et al.* 2012). Ainsi, chez les 595 pilotes étudiés, la prévalence de la plupart des affections médicales courantes (asthme, infarctus du myocarde, accident vasculaire, hypertension artérielle, diabète de type 2, dépression, en particulier) était plus faible que dans la population générale. En revanche, deux maladies ont été plus prévalentes chez les pilotes : le mélanome (19 pour 1000 vs. 0.4 pour 1000 dans la population générale Néo-Zélandaise) et les affections rénales (3.3 % vs 0.6 % dans la population générale). Les explications avancées ont été basées sur l'exposition solaire majorée pour le mélanome et la déshydratation en vol pour les problèmes rénaux.

4.3.8 Limites

L'association entre les expositions professionnelles des PN et le risque de survenue de maladies peut être difficile à évaluer. La sélection des sujets ou des groupes de contrôle peut être source de biais. Certaines études utilisent la comparaison avec la population générale. Cette comparaison peut conduire à une sous-estimation du risque relatif aux travailleurs parce qu'être en bonne santé est une condition d'emploi pour les membres d'équipage et de pilotage,

⁹ Situations très stressantes : forte demande et peu de contrôle : peu stressante : peu de demande et beaucoup de contrôle : active : forte demande et beaucoup de contrôle : passive : peu de demande et peu de contrôle

alors que la population générale comprend des personnes dans l'impossibilité de travailler pour des raisons de santé. C'est ce que l'on appelle le biais du travailleur sain.

De plus, dans de nombreuses études, des comparaisons multiples sont parfois effectuées lors de l'analyse des données en lien avec la santé, augmentant possiblement le nombre de fausses occurrences de signification (signification statistique).

4.3.9 Conclusions

En conclusion, concernant les maladies cancéreuses, l'analyse de la littérature ainsi que les résultats des monographies du CIRC ont permis de conclure à une augmentation de l'incidence de certains cancers, tels que les cancers de la peau (épidermoïdes et mélanomes) et les leucémies chez les personnels navigants. D'après la littérature et les monographies du CIRC, les rayonnements solaire et cosmique pourraient en être la cause.

Concernant les cancers de la prostate et du sein, maladies cancéreuses retrouvées chez les personnels navigants et identifiées dans la littérature, il est plus difficile de conclure sur une augmentation du risque en raison le plus souvent d'un manque d'études disponibles et de facteurs de confusion potentiels. Le CIRC a, quant à lui, conclu qu'il existait des preuves limitées chez l'humain mais suffisantes chez l'animal et solides au niveau mécanistique pour démontrer le lien entre ces maladies et le travail de nuit posté. Le CIRC a également conclu à un niveau de preuve suffisant pour le cancer du poumon en lien avec le tabagisme passif. Il n'est pas non plus possible de conclure pour les autres maladies cancéreuses identifiées dans la littérature (LNH, cancers du col de l'utérus, des ovaires, du cerveau, de la thyroïde, colo-rectal, de la vessie et des testicules) du fait d'un manque d'études ou de données inconsistantes.

A noter que le CIRC a émis des conclusions sur d'autres maladies cancéreuses en lien avec les expositions auxquelles les PN ont pu être exposés au cours de leur carrière (travail de nuit posté, rayonnements cosmique et solaire) qui n'ont pas été reprises dans ce rapport car ces maladies n'ont pas été identifiées dans la revue de la littérature réalisée dans le cadre de cette expertise. Concernant les maladies non cancéreuses, l'analyse de la littérature n'a pas permis de mettre en évidence d'augmentation du risque de maladies cardiovasculaires et respiratoires, de troubles musculo-squelettiques (TMS) ou troubles psycho-sociaux ni d'effets sur la reproduction féminine chez les personnels navigants.

Une synthèse de ces résultats est présentée dans le Tableau 10 pour les maladies cancéreuses et dans le Tableau 11 pour les maladies non cancéreuses.

Tableau 10 : Synthèse des résultats de la revue de la littérature (jusqu'au 1^{er} juin 2023) et des monographies du CIRC (83, 2004 ; 100D & E, 2012 et 124, 2020) pour les maladies cancéreuses

Maladies	Conclusions de la revue de la littérature	Expositions étudiées dans la revue de la littérature	Conclusions Monographies CIRC	Agents cancérogènes - CIRC
Mélanome	++	Rayonnement cosmique Durée d'emploi Longueur des vols internationaux	++	Rayonnement solaire
Épidermoïde de la peau	++	Rayonnement cosmique Durée d'emploi Longueur des vols internationaux	++	Rayonnement solaire UVA
Leucémie	++	Rayonnement cosmique Durée d'emploi Longueur des vols internationaux	-	
Lymphome non hodgkinien (LNH)	+/-	Durée d'emploi	-	
Cancer de la prostate	+	Rayonnement cosmique Trouble du rythme circadien	+	Travail posté
Cancer du col de l'utérus	+/-	Durée d'emploi		
Cancer des ovaires	+/-	Durée d'emploi	-	
Cancer du sein	+	Durée d'emploi Trouble du rythme circadien	+	Travail posté
Cancer du cerveau	+/-	Durée d'emploi	-	

Maladies	Conclusions de la revue de la littérature	Expositions étudiées dans la revue de la littérature	Conclusions Monographies CIRC	Agents cancérogènes - CIRC
Cancer du poumon	+/-	Durée emploi Tabagisme passif	++	Tabagisme passif
Cancer de la thyroïde	+/-	Rayonnement cosmique Durée d'emploi	-	
Cancer colo-rectal	+/-	Durée d'emploi	-	
Cancer de la vessie	+/-	Durée d'emploi	-	
Cancer des testicules	+/-	Rayonnements ionisants et non ionisants	-	
++ : plusieurs études de bonne qualité et d'équipes différentes montrent des associations statistiquement significatives + : il existe au moins une étude de bonne qualité qui montre une association statistiquement significative +/- : les études sont contradictoires ou la puissance est insuffisante pour conclure à l'existence d'une association				

Tableau 11 : Synthèse des résultats d'après les résultats de la revue de la littérature pour les maladies non cancéreuses

Maladies	Conclusion de la revue de la littérature	Expositions étudiées dans la revue de la littérature
Santé cardiovasculaire	+/-	Durée d'emploi
thrombose veineuse	+/-	Durée du voyage (passagers)
Santé reproductive femme		
fausse couche	+/-	Tabagisme
hyperprolactinémie	+	Travail posté
troubles menstruels	+/-	Travail posté
troubles du sommeil	+/-	Travail posté
érosions cervicales	+/-	Travail posté
avortement spontané	+	Hôtesse de l'air + passagers

Maladies	Conclusion de la revue de la littérature	Expositions étudiées dans la revue de la littérature
naissances avant terme <37 semaines	+	Passagers
mortalité intra-utérine	+	Personnels navigants
Santé respiratoire		
asthme	+/-	Durée d'emploi et tabagisme
bronchopneumopathie chronique obstructive	+/-	Durée d'emploi
bronchite chronique	+	Durée d'emploi et tabagisme
Troubles musculo-squelettiques et troubles psycho-sociaux	+/-	Travail posté
lombalgies	+/-	Travail posté
dépression	+/-	Pilotes de ligne
++ : plusieurs études de bonne qualité et d'équipes différentes montrent des associations statistiquement significatives + : il existe au moins une étude de bonne qualité qui montre une association statistiquement significative +/- : les études sont contradictoires ou la puissance est insuffisante pour conclure à l'existence d'une association		

4.4 Syndrome aérotoxique

Le « syndrome aérotoxique » fait aujourd'hui débat au sein de la communauté scientifique et de différentes parties prenantes de l'aviation civile. Au-delà du débat sur l'existence d'un syndrome qui atteindrait les personnels navigants, c'est également la terminologie « syndrome aérotoxique » qui fait débat car il suppose un lien de causalité entre une contamination de l'air des cabines d'avion et les symptômes rapportés. Dans ce rapport le terme « Syndrome aérotoxique » est utilisé en considérant les symptômes ressentis par le personnel navigant décrits par C. Winder et Balouet 2001 (Cf. partie 4.4.2).

La revue de la littérature effectuée spécifiquement sur le « syndrome aérotoxique », a permis d'identifier :

- La communication et l'article à l'origine de la terminologie « syndrome aérotoxique » qui a l'objet de plusieurs communications et articles ainsi qu'un mémoire de santé publique analysés par le *National Research Council (NRC)* au début des années 2000;
- 14 études décrivant les symptômes et hypothèses sur les polluants pouvant être à l'origine des symptômes ressentis ;
- 6 études de cas sur la recherche d'atteintes des PN suite à des épisodes de contaminations de l'air de la cabine.

En complément, 15 articles visant à documenter les biomarqueurs d'exposition et biomarqueurs d'effets pertinents au regard des substances incriminées ont été identifiées.

4.4.1 Origine du "Syndrome Aérotoxique"

A la fin des années 1990, plusieurs plaintes de membres d'équipages, dans le monde et plus particulièrement au Canada, ont été enregistrées dans lesquelles les personnels navigants rapportaient divers symptômes. Le toxicologue canadien Christian van Netten a émis l'hypothèse d'une contamination de l'air de la cabine comme origine de ces symptômes, du fait de l'apparition ponctuelle d'odeurs particulières dans la cabine des avions incriminés. Suite à l'étude de l'aéraulique des avions, il en a conclu qu'une contamination du *bleed air* liée à une fuite d'huile moteur (joint défectueux) avait pu conduire à une contamination de l'air de la cabine avec des composés issus des huiles moteurs utilisées (Van Netten 1998). Ce phénomène a depuis fait l'objet d'études visant notamment à caractériser cette contamination qui fait l'objet d'une autre terminologie débattue, « *fume event* » (Cf. partie 5.4.3).

A la même époque, le terme « Syndrome Aérotoxique » est proposé lors du "*Symposium on Air Quality and Comfort in Airliner Cabins*" qui s'est tenu en octobre 1999 à la Nouvelle-Orléans dans une communication de Jean-Christophe Balouet (*Environment International*) et Chris Winder (*School of Safety Sciences, University of New South Wales, Sydney*) (Balouet, Hoffman et Winder 1999). Il s'agissait pour les auteurs de regrouper sous une appellation unique, une même entité nosologique, un ensemble de troubles pathologiques résultant, selon eux, d'une exposition à une contamination de l'air des cabines d'avions par des composés toxiques, notamment lors des *fume events*. Selon ces auteurs, le « Syndrome Aérotoxique » regroupe donc un ensemble de troubles évoqués par des personnels navigants, ou observés

par du personnel de santé, à la suite d'émanations de fumées ou de brouillards, ou de ressentis d'odeurs telles que « chaussettes sales », « chien mouillé », etc. Parmi les troubles évoqués figurent des irritations de la sphère ORL (oto-rhino-laryngée), des troubles digestifs (nausées et vomissements), des troubles respiratoires (essoufflements et toux), des troubles neurologiques (fatigue modérée à intense, picotements des lèvres, vision floue, désorientation spatio-temporelle, dyspraxie), de syndrome dépressif, etc. (Cf. chapitre 4.4.2).

Peu après cette communication initiale, Balouet et Winder, associés à un médecin, Harry Hoffman (*Sacramento Occupational Medical Group*) ont publié un article (Balouet, Hoffman et Winder 1999) pour alerter sur les dangers que pourrait présenter une contamination de l'air des cabines d'avions par les vapeurs et aérosols de produits toxiques issus de carburants d'avions à réaction, de liquides dégivrants, de lubrifiants, d'huiles de moteurs et autres liquides organiques, et pour émettre des recommandations afin d'éviter une telle contamination. Les auteurs ont rapporté que des aérosols ou des vapeurs peuvent parfois parvenir dans la cabine de l'avion suite à une défaillance dans le système d'aération, notamment au niveau du prélèvement de l'air au niveau des moteurs ou du groupe auxiliaire de puissance, des conduites hydrauliques ou des filtres (Balouet, Hoffman et Winder 1999). Les auteurs rapportent qu'environ 300 incidents surviennent chaque année (environ 1 plainte tous les 25000 vols) et que plus de 40000 personnes (personnels navigants et passagers) seraient exposées de façon significative chaque année. Ces fréquences d'incidents de contaminations et leur association à des conséquences sanitaires sont rapportées dans deux résumés de congrès (Balouet, Hoffman et Winder 1999; C. Winder et Balouet 2000). Ils constituent les articles princeps sur le « Syndrome Aérotoxique » puisqu'ils sont cités en références de base dans les articles ultérieurement rédigés par ces mêmes auteurs.

En 2010, Chris Winder dans son mémoire de Santé publique consacré au « Syndrome Aérotoxique » (C. Winder 2010) a rapporté également que la proposition du terme « Syndrome aérotoxique » par Balouet et lui-même était un moyen d'attirer l'attention des pouvoirs publics et du monde de l'industrie aéronautique. Il reconnaissait cependant que cette dénomination pouvait être source de controverses : *"L'existence ou non du syndrome aérotoxique en tant que condition réelle reste discutable. Le terme polarise certainement l'opinion et cela peut ne pas être utile pour les personnes qui cherchent de l'aide. Au mieux, l'affection peut être considérée comme une forme de sensibilité chimique multiple associée à des émanations de fumées lors du travail dans l'industrie aéronautique"*.

En 2002, le Comité sur la qualité de l'air dans les cabines passagers des avions commerciaux¹⁰ du *National Research Council* (NRC) s'est intéressé aux études de Balouet et Winder (NRC 2002). Il est constaté que leurs articles publiés de 1998 à 2000 répètent de nombreuses données et s'est donc concentré sur l'article C. Winder et Balouet (2000) qui a été jugé avoir la présentation la plus claire de l'affirmation de l'existence d'un "Syndrome Aérotoxique".

Le Comité rend compte qu'il a été incapable de vérifier la source de l'affirmation des auteurs selon laquelle, les fuites, la fumée et les émanations en cabine pourraient exposer jusqu'à 40 000 passagers et équipages dans le monde, chaque année.

Le Comité a également noté que seulement trois symptômes (maux de tête, congestion des sinus et nausées) sont signalés dans trois études (Rayman et McNaughton 1983; Tashkin et

¹⁰ *Committee on Air Quality in Passenger Cabins of Commercial Aircraft*

al. 1983; Van Netten 1998) sur lesquelles s'appuient Balouet et Winder pour étayer l'existence de ce syndrome, et qu'il y a assez peu d'accord sur leur prévalence. Six études de cas sont également rapportées par C. Winder et Balouet (2000); toutefois, le Comité a eu du mal à les interpréter, compte tenu du manque de critères de sélection, de l'absence des sources concernant le matériel utilisé dans les résumés de cas, et du caractère incomplet et qualitatif des résumés. Ainsi, le Comité a conclu que « le niveau de preuve ne justifie pas la désignation d'un syndrome spécifiquement lié à l'exposition à divers agents physiques (par exemple, brouillards et fumées) et les produits de décomposition dérivés de fuites d'huile moteur ou de fluides hydrauliques ». Le Comité a recommandé que, jusqu'à ce que ces preuves soient disponibles, la désignation « Syndrome Aérotoxique » ne soit pas utilisée pour des symptômes signalés en rapport avec une contamination de l'air de la cabine.

Discussion du groupe de travail

A l'instar du NRC, le groupe de travail relève que les publications courtes (présentation et articles de congrès) de Balouet et Winder, qui sont souvent de quasi-doublons, souffrent de nombreux manques d'informations sur :

- Les techniques de sélection employées pour le recueil des données.
- La qualité des données recueillies.
- La qualité des rapports obtenus lorsqu'il y a citation de rapports d'évènements.
- Les données d'exposition des personnels étudiés.
- Les méthodes de recueil des données « cliniques » des personnels exposés.

Des listes et des tableaux de données « cliniques » sont établis mais à la lecture des rapports, il n'est pas possible de connaître les méthodes de recueils de ces données (formation des personnels, instrument utilisés, etc.) ni les seuils décisionnels, ni les valeurs de référence utilisés. C. Winder, Fonteyn et Balouet (2002) ont énuméré un certain nombre de troubles, de modifications cliniques et biologiques, sans détailler les méthodes d'évaluations, ni les tests cliniques et biologiques réalisés, ni quels paramètres sont modifiés, ni dans quelles proportions ces paramètres sont modifiés. Aucun des articles de ces auteurs ne fait de critique des méthodes, ni de recherche de biais éventuels.

La façon dont les effets nocifs ont été évalués (par les sujets eux-mêmes, par du personnel non spécifiquement formé) est discutable sur le plan scientifique. De plus, les critères de cohérence externe (les études épidémiologiques ont été réalisées par les mêmes auteurs) et de spécificité (les effets nocifs peuvent se rapporter à un grand nombre de causes différentes) font défauts.

Pour justifier son raisonnement Chris Winder cite John Tukey dans son mémoire de Master de santé publique (C. Winder 2010): « Mieux vaut une réponse approximative à la bonne question, qui est souvent vague, qu'une réponse exacte à la mauvaise question, qui peut toujours être précisée ».

On retrouve également des autocitations systématiques, par exemple dans C. Winder et Balouet (2001).

Il est noté l'emploi de nombreuses références obsolètes ou inappropriées. Par exemple, dans C. Winder et Balouet (2001), "*more recently*" fait référence à des articles de 1964, 1988, 1991. La référence de 1964 concerne 2 pilotes qui pulvérisaient des insecticides organophosphorés

engendrant une intoxication aiguë. Des références de 1930, 1931 et 1958 concernent la toxicité des TCP et du ToCP suite à des administrations *per os* à fortes concentrations.

A l'origine, deux auteurs ont proposé de nommer ce « syndrome aérotoxique », listant de nombreux symptômes sans critère précis et sur la base principalement d'études de cas cliniques de faible valeur scientifique, publiés parfois dans des journaux dont la société éditrice rentre dans les critères de revues prédatrices Beall¹¹ en 2016, aux conditions de publication très permissives.

A noter, les mêmes critiques peuvent également être formulées à l'égard des publications plus récentes s'intéressant au syndrome aérotoxique (Michaelis, Burdon et Howard 2017; C. Howard, Michaelis et Watterson 2017; CV Howard *et al.* 2018; Roig *et al.* 2021).

4.4.2 Symptômes du « syndrome aérotoxique »

Les symptômes rapportés dans les publications traitant du syndrome aérotoxique sont très variés et aspécifiques. Les manifestations cliniques peuvent survenir immédiatement après l'évènement, ou peuvent être retardées ; dans ce cas, elles sont principalement d'ordre neurologique ou neuropsychiatrique. Les troubles peuvent être transitoires, ou se chroniciser.

Selon les auteurs traitant du « syndrome aérotoxique », la gravité et/ou la chronicisation des troubles miment principalement les troubles induits par les organophosphorés, qui sont d'ordre neurologique ou neuropsychiatrique, par exemple des OPIDN (neuropathie retardée induite par les organophosphorés) ou des OPICN (neuropathie chronique induite par les organophosphorés).

La gravité de ces manifestations va de la simple gêne, au stade d'invalidité permanente, et peut conduire au décès dans les cas les plus graves (Balouet, Hoffman et Winder 1999; Abou-Donia *et al.* 2013; Abou-Donia, Van de Goot et Mulder 2014; Michaelis, Burdon et Howard 2017; Hageman, Pal, Nihom, Mackenzie Ross et Berg 2020; Hageman, Pal, Nihom, Mackenzie Ross et van den Berg 2020; Roig *et al.* 2021).

Une liste non exhaustive des symptômes a été établie par un consortium de recherche en santé au travail dans l'aviation, l'« *Occupational Health Research Consortium in Aviation* »¹², en 2014 à partir des publications traitant du « syndrome aérotoxique » (OHRCA 2014) (Tableau 12 et Tableau 13).

¹¹ <https://beallslist.net/>

¹² L'OHRCA regroupe le centre de recherche sur l'éducation au travail de l'Université de l'Oregon, la division de la médecine du travail et de l'environnement de l'Université de Californie San Francisco, l'École de santé publique et des populations de l'Université de Colombie-Britannique, l'Association des agents de bord (syndicats de travailleurs : Communications Workers of America (CWA) - American Federation of Labor - Congress of Industrial Organizations (AFL-CIO)). Les écoles de santé publique de l'Université de Harvard et de Berkley sont également partenaire du consortium. Il est financé par la FAA.

Tableau 12 : Symptômes aigus rapportés après une exposition à du bleed air contaminé (traduit de OHRCA 2014)

Respiratoires	Toux Essoufflement Oppression thoracique Respiration sifflante Irritation des yeux, du nez ou de la gorge
Neurologiques	Maux de tête Vertiges Etourdissement Troubles de la mémoire Difficultés de concentration Changements visuels Tremblements Troubles de la marche Paresthésies Troubles de l'équilibre Ralentissement du traitement mental Difficulté à effectuer plusieurs tâches à la fois
Systémiques	Nausées, vomissements Fatigue Faiblesse musculaire Palpitations Diarrhée
Psychiatriques	Anxiété Troubles du sommeil Dépression Trouble déficitaire de l'attention
Cutanés	Eruption cutanée

Tableau 13 : Symptômes chroniques rapportés après une exposition à du bleed air contaminé (traduit de OHRCA 2014)

Respiratoires	Toux Essoufflement Oppression thoracique Respiration sifflante
Neurologiques	Maux de tête Ralentissement du traitement mental Difficulté à effectuer plusieurs tâches à la fois Troubles de l'équilibre Difficultés de concentration Changements visuels Tremblements Troubles de la marche Paresthésies Troubles de l'équilibre
Systémiques	Nausées, vomissements Fatigue Faiblesse musculaire Palpitations Diarrhée

Psychiatriques	Anxiété Troubles du sommeil Dépression Trouble déficitaire de l'attention
Cutanés	Eruption cutanée

Les auteurs du rapport AVOIL, projet de l'EASA décrit dans le chapitre 2.6.2, notent que les symptômes rapportés sont nombreux et variés, et comme seule une partie des personnes exposées en développe, cela rend difficile leur classification dans un groupe spécifique de maladie ou de syndrome (EASA 2017a). Les auteurs indiquent qu'il est donc extrêmement difficile, voire impossible, d'établir un lien de causalité entre la qualité de l'air de la cabine et les symptômes auto-déclarés qui ressortent des différents examens et questionnaires de santé. Des examens approfondis n'ayant pas pu établir de résultats cliniques liés à des expositions spécifiques et la variété et la nature non spécifique des plaintes suggèrent qu'il pourrait s'agir en partie de symptômes physiques somatiquement non expliqués (EASA 2017a).

Les symptômes attribués à des facteurs environnementaux font partie de cette catégorie. Il existe plusieurs sous-groupes de symptômes liés à différents types ou sources d'expositions telles que les produits chimiques, le bruit, les champs électromagnétiques etc. C'est le cas par exemple des individus atteints du syndrome d'intolérance aux odeurs chimiques, qui expriment une variété de symptômes subjectifs, touchant plusieurs organes (brûlures buccales et pharyngées, dyspnée, asthénie, céphalées, difficulté de concentration...) (Dupas et Dagorne 2013). Dans certains cas, la sensibilité environnementale peut expliquer pourquoi certaines personnes souffrent après une exposition à de faibles doses d'un agent toxique tandis que, pour d'autres, les symptômes physiques ne sont pas explicables, en l'état, par une cause organique. De tels symptômes peuvent également apparaître par un mécanisme de renforcement par le stress induit par l'expérience d'une situation anormale, comme un *fume event* (EASA 2017a). Cependant, les données épidémiologiques actuelles sur les personnels navigants ne permettent pas de déterminer la prévalence de symptômes physiques somatiquement inexpliqués, car lorsque l'on essaie de comparer les études, on rencontre des problèmes de comparabilité en termes de population étudiée, de composition de l'échantillon et de symptômes inclus.

4.4.3 Hypothèses sur les polluants pouvant être à l'origine des symptômes ressentis

L'hypothèse d'une contamination de l'air de la cabine d'avion *via* le *bleed air* par des huiles moteurs ou fluides hydrauliques ressort des références à l'origine du « syndrome aérotoxique ». De ce fait, plusieurs études se sont intéressées à la composition de ces huiles et fluides, ainsi qu'à leurs produits de dégradation, lorsqu'ils sont chauffés ou pyrolysés (Cf. chapitre 5.4.5.1), afin d'identifier si certains de ces produits pouvaient être à l'origine des symptômes ressentis.

Les études expérimentales pour évaluer la toxicité de ces produits et les études recherchant des biomarqueurs d'exposition et d'effets en lien avec ces huiles sont présentées dans les paragraphes suivants.

Plus récemment, la possibilité d'une contamination de l'air des cabines par des nanoparticules carbonées a été également discutée.

4.4.3.1 Polluants émis par les huiles moteur et fluides hydrauliques

En 1998, Van Netten a documenté sur une période de 4 mois les troubles ressentis par l'équipage, et les résultats de campagnes de mesure de la qualité de l'air des cabines en vol et dans des conditions expérimentales testant une fuite d'huile. Il est rapporté, d'une part les symptômes et le nombre d'individus, et d'autre part les composés présents dans la cabine et le cockpit constatant que les composés de la famille des crésyl phosphates présents dans les huiles moteurs n'ont pas été détectés dans l'air des cabines d'avions (Van Netten 1998).

Plusieurs scientifiques ont depuis recherché à identifier les contaminants produits par la dégradation thermique des liquides lubrifiants, liquides dégivrants et autres, qui pourraient contaminer le *bleed air* (Cf. chapitre 5.4.5), sans toutefois que des mesures de ces contaminants aient pu être réalisées au cours de fume events rapportés (Cf. chapitre 5.5)

Le potentiel néfaste de ces liquides a été suspecté et étudié dans divers articles (Van Netten 1998; Balouet, Hoffman et Winder 1999; C. Winder et Balouet 2002; C. Winder et Balouet 2001; C Winder et Michaelis 2005; C. Winder 2010; Cox et Michaelis 2002; Hale et Al-Seffar 2009; Bagshaw 2013; Hayes *et al.* 2021; C. Howard, Michaelis et Watterson 2017; Michaelis, Burdon et Howard 2017; Michaelis 2010).

L'EASA a fait réaliser une étude pour caractériser la toxicité des composés émis par les huiles utilisées dans les moteurs d'avion, après pyrolyse. Les résultats de cette étude exécutée par le TNO et le RIVM aux Pays Bas ont été publiés sous la forme d'un rapport en 2017 (EASA 2017a, Cf. chapitre 2.6) reposant sur un modèle *in vitro* de barrière pulmonaire. Une exposition aiguë de 30 minutes à ces produits ne provoque pas de changement significatif dans l'activité des neurones. Cependant, les auteurs ont suggéré que des concentrations plus élevées pourraient affecter l'activité des neurones, mais il est pratiquement impossible de vérifier cette hypothèse en raison de la cytotoxicité aiguë qu'elles causent aux cellules pulmonaires. Les résultats montrent que des produits neuroactifs sont présents dans les produits de pyrolyse, mais leur concentration en présence d'une barrière pulmonaire intacte est trop faible pour affecter la fonction neuronale. Les effets apparaissent transitoires et l'activité neuronale est comparable au contrôle après 24 heures d'exposition. Cependant, une exposition prolongée peut aggraver leur potentielle toxicité, ce qui nécessite des recherches supplémentaires.

À noter qu'une étude de toxicité par inhalation des vapeurs d'huiles était prévue sur des souris dans le cadre du projet FACTS. La neurotoxicité devait être évaluée sur la base d'études de comportement, d'histologie et l'étude devait également permettre la recherche de biomarqueurs (European Commission 2020a). Cependant cette étude n'a pu être initiée avant la fin du projet en raison de retard d'autorisation du comité d'éthique animale, mais elle est reconduite dans le cadre du projet CAQIII de l'EASA actuellement en cours (Cf. chapitre 2.6).

Il n'existe donc actuellement pas d'étude permettant de démontrer une neurotoxicité des produits de pyrolyses des huiles de moteur d'avion.

4.4.3.2 Crésyl esters de phosphates

Les esters de phosphates sont utilisés comme additifs dans les lubrifiants des moteurs, afin de former un film protecteur à la surface des pièces métalliques en mouvement (Johnson et Hils 2013). Ces composés sont réputés d'une très faible toxicité, excepté pour l'isomère ortho de la famille des phosphates de tricrésyle (TCP), dont des mélanges sont notamment utilisés dans les huiles de moteurs d'avions à un taux de 1-3% (Johnson et Hils 2013). Or il est connu depuis 1930 et la catastrophe sanitaire du "*Jamaica Ginger*", aux USA, que l'ingestion de l'isomère ortho du tricrésylphosphate (ToCP) provoque des neuropathies à effet retardé (Furlong 2011; Costa 2018).

Le ToCP est 10 fois plus toxique que les isomères méta et para car il présente la particularité de se cycliser après oxydation, par des cytochromes P450, en un métabolite très toxique, le [2-(o-cresyl)-4H-1,3,2-benzodioxaphosphoran-2-one] (CBDP) (Furlong 2011). Le phénotype du cytochrome P450 est important dans la métabolisation du ToCP en CBDP, les isoenzymes 2B6, 2C18, 2D6, 1A2, 3A4, 3A5 sont responsables de cette bioactivation et plus particulièrement 1A2 et 3A4 (Reinen *et al.* 2015). Des différences d'activité de variants naturels d'isoenzymes P450 et de la Paraoxonase 1 capable de détoxifier le CBDP peuvent engendrer des différences de sensibilité interindividuelle, d'un facteur 4000 (da Silva *et al.* 2021, de Ree *et al.* 2014, European Commission 2020b). Des facteurs génétiques et environnementaux (prise de médicaments, aliments, toxiques, inducteurs de 1A2 ou de 3A4) peuvent donc être des facteurs à prendre en considération dans la genèse des troubles dus au ToCP.

La toxicité du CBDP provient de sa capacité à rapidement former une liaison covalente avec le résidu sérine du site actif des enzymes de la famille des estérases, en particulier les cholinestérases et la *neuropathy target esterase* (NTE). La formation de cette liaison covalente avec le site actif des cholinestérases conduit à leur inhibition irréversible et à une crise cholinergique majeure, en cas d'intoxication aiguë (plus de 90% des cholinestérases inhibées) et rapidement mortelle (Costa 2018). La réaction d'inhibition des cholinestérases par le CBDP a notamment été étudiée à l'échelle moléculaire (Carletti *et al.* 2011). Des échantillons de sang prélevés chez des passagers ont montré un taux faible inférieur à 3% de la butyrylcholinestérase plasmatique, et aucune inhibition d'activité significative, donc très loin des niveaux de modification pouvant entraîner des symptômes (Liyasova *et al.* 2011). La réaction du CBDP avec la NTE conduit à une modification de cette lipase, qui lorsqu'elle est inhibée à plus de 70% (Freudenthal *et al.* 1993), induit une dégradation de l'axone des neurones moteurs et à l'OPIDN, suivant un mécanisme encore méconnu (Costa 2018; Freudenthal *et al.* 1993).

Daughtrey *et al.* ont testé trois types de lubrifiants d'aviation contenant 3 % (m/m) de TCP et les ont comparés au ToCP chez le poulet par voie orale, l'espèce la plus sensible à ce type de neurotoxicité (Daughtrey *et al.* 1996). Un mélange d'isomères de TCP (dont moins de 1% de ToCP) contenus dans un lubrifiant d'aviation n'a produit aucun effet à une dose orale de 30 mg.kg⁻¹, alors que le ToCP a produit une OPIDN à une dose de 7,5 mg.kg⁻¹, ce qui indique que ces mélanges sont au moins quatre fois moins toxiques que le ToCP lui-même. Cependant, d'autres huiles contenant 3 % de mélange de TCP, dont moins de 0,02% de ToCP, ont tout de même été capables d'induire plus de 70% d'inhibition de la NTE chez le poulet (voie orale) et, en conséquence, une neuropathie retardée, suggérant que des huiles provenant de sources différentes présentent des potentiels neurotoxiques différents, indépendamment de leur teneur en ToCP, probablement en raison de la présence d'impuretés organophosphorées à fort potentiel (Freudenthal *et al.* 1993). Les différentes études menées permettent d'estimer une dose sans effets secondaires (*No Adversary Effect Level*) à 0,13

mg/kg/j pour le TCP (9,1 mg/j), à mettre en perspective avec un scénario du pire donnant une exposition de 5 µg/j pour un pilote (10h de vol), soit une exposition 1800 fois inférieure à la dose sans effets secondaires (de Boer *et al.* 2015).

La limite d'exposition professionnelle pour les tricrésylphosphates tient compte du fait que le ToCP est le plus toxique, elle est donc fixée à 0,1 mg.m⁻³ et n'est pas indicative de la toxicité des isomères méta et para. Les concentrations de TCP relevées ne peuvent à elles seules expliquer les troubles rapportés par les équipages, et une cause multifactorielle est à rechercher (différents toxiques, hypoxie, O₃, produits de dégradation (pyrolyse), susceptibilité individuelle). Liyasova *et al.* ont formulé l'hypothèse que les TCP pourraient agir sur d'autres cibles, en hyperphosphorylant des protéines du système nerveux central, provoquant des dommages au cytosquelette, une dérégulation du transport axonal, des pertes de connexions entre neurones avec disparition des synapses et, au final, une lente neurodégénérescence (Liyasova *et al.* 2011). Cette hypothèse reste à être testée par des expérimentations sur modèles animaux.

4.4.4 Etudes de cas

Les troubles invalidants rapportés sont en très grande majorité, pour ne pas dire en totalité, d'ordre neuropsychologique ; c'est la raison pour laquelle les 6 études de cas recensées ont porté sur la recherche des atteintes (neurologiques, cérébrales) et de marqueurs pouvant caractériser ces atteintes. Il convient de noter que ces biomarqueurs peuvent être aussi présents lors d'atteinte cérébrale consécutive à un traumatisme crânien.

Les auto-anticorps de classe IgG constituent des biomarqueurs tardifs de l'atteinte neuronale (ils se développent à distance de l'atteinte cérébrale) ; et certains de ces auto-anticorps peuvent aussi permettre aux lésions d'évoluer (de s'étendre) dans le temps.

Abou-Donia *et al.* (2013)¹³ présentent le suivi d'une petite cohorte de personnels navigants bien portants (N=34) par rapport à un groupe témoin, non personnel navigant (N=12). Chez les personnels navigants, il est mis en évidence la présence de quantité significatives d'auto-anticorps sériques (IgG) de types : anti-NFP, anti-Tau, anti-tubuline, anti-MBP, anti-MAP-2, anti-GFAP, anti-S100B, sans que ceux-ci n'aient vécu un *fume*, ou *smell event*. Un pilote a présenté des troubles neurologiques au cours de l'étude et il a été possible de comparer ses concentrations sériques en auto-anticorps pendant les troubles, et après cessation de travail. Il est observé une augmentation de la plupart de ces auto-anticorps au moment des troubles et une diminution après cessation du travail. Selon les auteurs, il serait donc possible d'utiliser ces auto-anticorps comme biomarqueurs d'atteintes du système nerveux central.

Pour le pilote qui a été en arrêt de travail, suite à des troubles neuropsychologiques invalidants, la concentration moyenne des isomères du TCP de l'air de la cabine était de 0,65 ng.m⁻³ et celle de la poussière de la cabine était de 1270 ng.cm⁻². A ce moment, le pilote présentait des troubles de la mémoire.

¹³ Les conflits d'intérêts ne sont pas cités. L'un des co-auteurs, MFA Mulder est médecin et ancien pilote, déclaré inapte (comme pilote) en 2006. Il est un consultant privé et une page lui est consacrée sur le site « Bleedfree.eu ».

Abou-Donia, Van de Goot et Mulder (2014)¹⁴ présentent le cas d'un pilote décédé d'une overdose de phénobarbital (automédication probable, suite à des troubles du sommeil). Ce pilote souffrait de maladie neurodégénérative, prouvée par l'analyse histopathologique *post-mortem* et par des dosages des auto-anticorps, en *ante-mortem*, dirigés contre les cellules du système nerveux central et périphérique. Les auto-anticorps dosés étaient tous élevés : anti-NFP, anti-Tau, anti-tubuline, anti-MBP, anti-MAP-2, anti-GFAP, anti-S100B. Les auteurs pensent qu'il s'agit d'une neuropathie retardée induite par les organophosphorés (OPIDN). Les signes cliniques initiaux rapportés par le pilote sont des troubles de la vision avec scintillements, engourdissement des 4 membres, remontant jusqu'aux coudes et aux genoux. Plus tard, il était noté des paresthésies des 2 jambes et des 2 bras. Il pourrait s'agir d'une OPIDN ayant évoluée en OPICN jusqu'au décès. Le pilote n'a pas expérimenté de *fume event* durant sa carrière, mais a senti des odeurs désagréables à plusieurs reprises. La relation cause-effet n'est cependant pas prouvée.

Heutelbeck *et al.*¹⁵ ont réalisé en 2016 des mesures de biomarqueurs pour le suivi d'une exposition aux organophosphorés : activité acétylcholinestérase (AChE) et *Neuropathie Target Esterase* (NTE) sur 11 PN dans les 5 jours ayant suivi un évènement de contamination de cabine avec fumées. Les activités AChE mesurées sont normales mais les activités NTE sont groupées vers les niveaux faibles, dont un patient avec une activité hors des valeurs de référence. Ces résultats suggèrent une inhibition probable des activités NTE chez ces patients, ce qui justifierait, d'après les auteurs, une enquête plus approfondie. Ils notent cependant qu'il n'est pas possible de retenir une corrélation directe entre les manifestations observées et des composés particuliers.

Dans l'étude de Reneman *et al.* (2016), il s'agissait d'objectiver les troubles neurologiques rapportés par le personnel navigant *via* l'analyse de lésions cérébrales. La neuro-imagerie a été utilisée pour le personnel navigant se plaignant de troubles neurocognitifs (N=12). Un groupe témoin (volontaires sains principalement pilotes de courses n'ayant pas fait de vols pour des raisons professionnelles) a été constitué (N=11). Il y avait plus de fautes aux tests neuropsychologiques dans le groupe PN que dans le groupe témoin. Il était noté une subtile atteinte de la substance blanche dans le groupe PN. Il existait une relation statistiquement positive entre les troubles décrits par les PN exposés et l'intégrité de la substance blanche de ces PN. Cependant, ces altérations n'étaient pas corrélées au nombre d'heures de vol.

En 2019, deux autres cas cliniques sont décrits par Hageman, Pal, Nihom, Mackenzie Ross et Berg (2020) et Hageman, Pal, Nihom, Mackenzie Ross et van den Berg (2020), en plus du cas décrit par Abou-Donia *et al.* (2013). Sur ces trois patients, un patient a eu un dosage de butyrylcholinestérase (BChE) plasmatique, durant cinq jours après un vol long -courrier. Pour ce patient, la BChE était basse sur les 2 premiers jours et il a été noté une remontée d'activité de la BChE plasmatique au 3ème jour. Les trois patients sont polymorphes pour la paraoxonase I (PON-1 192 et PON-1 55) et il est également mis en évidence un polymorphisme CYP450 chez deux des patients (non évalué chez le 3ème patient), sans qu'aucun détail sur le type de polymorphisme ne soit toutefois donné. Les auto-anticorps anti-MBP, anti-MAP-2 et anti-GFAP sont augmentés chez les trois patients, alors que les anticorps anti-S-100B sont absents.

¹⁴ Les conflits ne sont pas cités. Il est à noter que le Dr Mulder est à nouveau co-auteur.

¹⁵ Les liens d'intérêt des auteurs ne sont pas cités.

Dans un article récent, Roig *et al.* (2021) ont donné trois descriptions de cas cliniques assez complètes de personnels navigants exposés à des *smoke* et/ou à des *smell events* souffrant d'asthme transitoire. Les dosages sanguins de deux sujets mettaient en évidence une élévation des marqueurs d'atteinte neuronale. Les auteurs supposent qu'il existe une susceptibilité individuelle (génétique, avec expression de phénotypes enzymatiques particuliers) dans le développement de troubles liés aux *fume events*.

En conclusion, ces études de cas ne permettent pas d'établir un lien entre les troubles et les marqueurs identifiés, avec une contamination de l'air de la cabine d'avion. Elles reposent sur un nombre limité de sujets et ne fournissent pas toujours le détail des méthodes utilisées comme par exemple les méthodes de dosage.

En particulier, lorsque l'on considère les marqueurs d'atteinte neuronale ou des cellules gliales, que ce soit des peptides ou des auto-anticorps, il convient de prendre en compte toute l'histoire traumatologique du sujet étudié (sport, accident, etc.). De même, les antécédents infectieux (encéphalites virales ou bactériennes, etc.) doivent pouvoir être pris en compte or ceux-ci sont absents de ces études de cas. Ces études souffrent enfin d'un manque de valeur basale pour chaque sujet, en l'absence de dosage des marqueurs avant exposition, mais également d'un manque de suivi sur l'évolution dans le temps des niveaux de biomarqueurs en fonction de la reprise ou non de l'activité professionnelle.

4.4.5 Biomarqueurs

Il existe différents types de biomarqueurs : d'exposition, d'effet, de susceptibilité ou de sensibilité. Un biomarqueur d'exposition à un agent chimique est un paramètre (la substance mère, l'un de ses métabolites, ou le produit fixé sur les cibles ou sur des sites non critiques), mesuré dans une matrice biologique et dont la variation est associée à l'exposition à l'agent et/ou des effets sanitaires. Un biomarqueur d'effets indique des modifications/altérations biochimiques produites dans l'organisme pouvant être corrélées à l'exposition et susceptibles de signaler précocement une maladie découlant de l'exposition étudiée, pour en permettre la guérison ou en prévenir l'aggravation.

La recherche de biomarqueurs pour le suivi de l'exposition à des contaminants présents dans l'air des cabines d'avion est essentiellement centrée sur l'hypothèse d'une exposition au ToCP et des modifications entraînées par son métabolite toxique, le CDBP, soit la formation d'adduits CDBP-protéines, ou sur l'inhibition de l'activité d'enzymes, suite à leur réaction irréversible avec le CDBP (Marsillach *et al.* 2013). Les enzymes cibles étudiées sont principalement la butyrylcholinestérase plasmatique (activité et adduits) et la NTE (activité). D'autres recherches portent sur les biomarqueurs de lésions neuronales / cérébrales, mais qui ne sont pas spécifiques à une exposition à un contaminant.

4.4.5.1 Biomarqueurs d'exposition et d'effet des OP

4.4.5.1.1 Cholinestérases

La réaction du CDBP avec l'acétylcholinestérase et la butyrylcholinestérase (AChE et BChE) a été étudiée en détail *in vitro* (Carletti *et al.* 2011). L'acétylcholinestérase (AChE) est une

sérine hydrolase jouant un rôle essentiel dans la neurotransmission en hydrolysant le neurotransmetteur acétylcholine, dans le système nerveux central et périphérique. L'inhibition irréversible de plus de 70% de l'AChE (Thiermann *et al.* 2010), par les neurotoxiques organophosphorés, entraîne une accumulation rapide d'acétylcholine dans les tissus, et un dysfonctionnement des récepteurs nicotiques et muscariniques de l'acétylcholine engendrant un syndrome cholinergique majeur. Les symptômes principaux sont de l'hypersécrétion salivaire et bronchique, une contraction des muscles lisses (myosis, bronchoconstriction, douleurs abdominales...), une stimulation symptomatique (tachycardie, hypertension), une dépolarisation des muscles striés (fasciculation, paralysie), une dépression du système nerveux central (sommolence, coma), des apnées qui entraînent la mort par défaillance cardio-respiratoire (Dorandeu et Nachon 2017). Une seconde cholinestérase est présente chez les mammifères : la butyrylcholinestérase (BChE). Cette enzyme homologue est capable d'hydrolyser des substrats plus gros que l'AChE. Elle est présente dans de nombreux tissus (cerveau, foie, cœur, poumon, estomac, plasma...), n'a pas de rôle physiologique clairement identifié. Cependant, elle peut suppléer l'AChE lorsque cette dernière est défaillante ; elle joue un rôle dans l'hydrolyse des xénobiotiques dans le sang (cocaïne, suxamethonium...) et réagit rapidement avec les organophosphorés (Lockridge 2015).

Le CBDP a la particularité de réagir extrêmement rapidement avec la BChE, à une vitesse comparable à celle du VX, l'un des neurotoxiques de guerre le plus puissant (constante de réaction $\sim 10^8 \text{ M}^{-1}\text{min}^{-1}$). La vitesse de réaction du CBDP avec l'AChE est notoirement plus faible, de 1 à 2 ordres de grandeur, comparable à celle des pesticides organophosphorés utilisés en agriculture et, pour cette raison, nettement moins toxiques pour l'humain (Worek *et al.* 2004). La réaction conduit à la formation d'un adduit covalent rendant l'enzyme irréversiblement inactive (Carletti *et al.* 2011). La mesure de l'inhibition de l'activité des cholinestérases sanguines basée sur la méthode colorimétrique d'Ellman permet théoriquement de mettre en évidence une exposition au CBDP, jusqu'à plusieurs semaines après l'exposition, mais de nombreuses limites réduisent l'applicabilité de cette méthode (Marsillach *et al.* 2013). La grande variabilité interindividuelle de l'activité cholinestérasique sanguine, y compris journalière pour la BChE plasmatique, nécessite de disposer de valeurs de référence individuelles pour constater une inhibition d'un minimum de 20%. Cette méthode est inapplicable pour les expositions à des faibles doses d'organophosphorés entraînant une faible inhibition des cholinestérases, qui sera facilement masquée par le renouvellement naturel de ces enzymes (Marsillach *et al.* 2013).

Après réaction du CBDP avec la BChE, l'adduit initial crésyl phosphate évolue rapidement en phosphate, une forme d'adduit jamais observée avec d'autres organophosphorés, et permettant en théorie de discriminer une exposition au CBDP de celle à un autre organophosphoré (Carletti *et al.* 2011; Schopfer, Furlong et Lockridge 2010). La formation de ces adduits spécifiques a conduit au développement de méthodes analytiques pour rechercher la présence de ces adduits chez la BChE plasmatique purifiée à partir de prélèvements sanguins (Schopfer, Furlong et Lockridge 2010; Marsillach *et al.* 2011). L'une de ces méthodes avec une limite de détection de 0,05% de BChE plasmatique modifiée (échantillon de 16 μg) a été testée sur 12 passagers (Liyasova *et al.* 2011) : 6 d'entre eux avaient les adduits spécifiques de BChE dans leur plasma, mais moins de 1% de la BChE était modifiée pour 4 des échantillons, avec un maximum de 3% de modification observée. A noter qu'aucun des passagers ne présentait de symptômes et que la mesure de l'activité BChE n'a rien révélé, ce qui est compatible avec le niveau de modification relevé. Les adduits n'étaient plus détectables après 3 mois. Cette même méthode, avec une limite de détection rapportée de 0,1% de

butyrylcholinestérase modifiée extraite de 0,5 mL de plasma, a montré l'absence d'adduits chez des pilotes d'avions de chasse F16 en bonne santé (Tacal et Schopfer 2014).

4.4.5.1.2 *Neuropathy Target Esterase*

La NTE est une estérase membranaire, ancrée sur la face cytoplasmique du réticulum endoplasmique, principalement présente dans le cerveau, dans les neurones longs (Richardson *et al.* 2020; Marsillach *et al.* 2013). Elle possède une activité lysophospholipase lui conférant un rôle possible dans le métabolisme des phospholipides et le remodelage des membranes, activité dont l'inhibition peut conduire à une OPIDN. La présence de la NTE dans les lymphocytes sanguins et la constatation que son inhibition est corrélée à l'inhibition de la NTE cérébrale posent la NTE comme un autre biomarqueur potentiel de l'exposition aux composés organophosphorés neuropathiques, d'autant que son inhibition peut être mesurée jusqu'à 4 jours après l'exposition (Marsillach *et al.* 2013). Cette qualité de biomarqueur a été exploitée pour 11 personnels navigants présentant des troubles (irritations de la peau et des muqueuses, effets sur le tractus respiratoire, le tractus gastrointestinal et le système nerveux central) après avoir vécu un événement « *fume event* » (Heutelbeck *et al.* 2016). Contrairement aux activités cholinestérasiques sanguines qui étaient normales, les activités NTE lymphocytaires de ces patients, mesurées 5 jours après exposition, étaient basses par rapport aux valeurs d'activités NTE lymphocytaires de référence d'une autre publication, avec un individu présentant une activité 2 fois inférieure à la limite basse.

4.4.5.1.3 *Autres biomarqueurs*

D'autres adduits protéiques spécifiques d'une exposition au ToCP ont été rapportés dans la littérature et concernent l'albumine et l'acylpeptide hydrolase érythrocytaire (European Commission 2020b, Schopfer, Furlong et Lockridge 2010; Marsillach *et al.* 2013; Marsillach *et al.* 2011). Comme pour les adduits de la BChE, leur présence permet de démontrer une exposition au ToCP, même faible, sans toutefois établir un lien de causalité entre les adduits mesurés et des symptômes reportés.

4.4.5.1.4 *Conclusions des experts sur la pertinence et les limites de ces biomarqueurs*

La mesure sanguine de l'activité des cholinestérasés présente un intérêt dans les cas d'intoxications aiguës par les organophosphorés, auquel cas la baisse d'activité est décelable par rapport aux valeurs de référence. Du fait de ce manque de sensibilité, une mesure d'absence d'inhibition ne signifie pas qu'il n'y a pas eu exposition à un organophosphoré. La recherche d'adduits sur les cholinestérasés, ou sur d'autres protéines sanguines, par des méthodes plus sensibles de spectrométrie de masse, doit alors être utilisée pour mettre en évidence l'exposition, sans toutefois pouvoir établir un lien de cause à effet. Seule, l'activité de la NTE lymphocytaire semble établir un lien, puisqu'une inhibition probable a été mesurée chez des personnels navigants, quelques jours après une exposition supposée à un *fume event* (Heutelbeck *et al.* 2016).

4.4.5.2 Biomarqueurs de lésion neuronale/cérébrale

Des marqueurs d'atteintes neuronales ont été utilisés dans des études de cas cliniques de personnels navigant exposés à des événements fumées/odeur ; certains de ces personnels

navigants ont souffert aussi d'asthme transitoire (Abou-Donia *et al.* 2013; Abou-Donia, Van de Goot et Mulder 2014; Roig *et al.* 2021).

De nos jours, l'étude des marqueurs de lésion cérébrale, principalement d'origine traumatique, est en plein développement (Adrian *et al.* 2016). Par analogie avec les lésions cérébrales d'origine traumatique (Adrian *et al.* 2016), même s'il n'y a pas eu de choc avec effet de cisaillement, il pourrait être cependant recommandé de rechercher des marqueurs d'atteinte neuronale et des marqueurs d'atteinte des cellules gliales chez les personnels navigants présentant des troubles, suite à l'expérience d'un *fume event*, afin de mettre en évidence une potentielle lésion cérébrale, le GFAP pourrait être un marqueur potentiel (Pringle *et al.* 2018). L'utilité du dosage sérique d'autres biomarqueurs pourrait être envisagée en fonction de l'évolution des connaissances (Reddy, Shewokis et Izzetoglu 2022). En Annexe 13, est présenté l'origine cellulaire des potentiels biomarqueurs, leur différenciation et leur évolution.

A distance des événements déclencheurs, ou en l'absence d'évènement déclencheur, dans le cadre d'une suspicion d'une OPIDN ou d'une OPICN, il conviendrait de rechercher aussi, dans le sérum, des auto-anticorps spécifiques d'atteinte neuronale (Abou-Donia, Lieberman et Curtis 2018). En effet, dans cette étude, il est rapporté les niveaux de six types d'auto-anticorps neuronaux dans un groupe de 24 patients ayant été exposés à des substances toxiques, notamment de l'eau potable contaminée (quatre patients), des dommages causés par l'eau et les moisissures dans les bâtiments (huit patients), des pesticides (quatre patients) et d'autres produits chimiques toxiques (huit patients). Les niveaux des six auto-anticorps neuronaux étaient significativement élevés chez la plupart des patients et dans le groupe de patients en général, avec des niveaux moyens d'anticorps pour les 24 patients chimiquement exposés (par rapport à une population témoin en bonne santé), par ordre décroissant : 475 % pour les protéines tau, 391 % pour les protéines associées aux microtubules-2, 334 % pour les protéines des neurofilaments (NFP), 302 % pour la protéine basique de la myéline, 299 % pour les protéines acides fibrillaires gliales et 225 % pour la tubuline. Les auto-anticorps anti-protéine Tau étaient significativement élevés dans les groupes de patients souffrant de neuropathie périphérique, de douleurs musculaires et articulaires, d'asthme et de sensibilité chimique. Les auto-anticorps anti-tubuline étaient significativement plus élevés chez les patients souffrant de sensibilité chimique et d'asthme, les auto-anticorps anti-NFP étaient significativement plus élevés chez les patients souffrant d'apnée du sommeil, tandis que les auto-anticorps anti-S-100B étaient significativement plus élevés chez les patients souffrant de douleurs musculaires/articulaires, d'asthme et d'apnée/insomnie (Abou-Donia, Lieberman et Curtis 2018). Il s'agit d'une étude avec un nombre très limité de patients, cependant ces résultats devraient inciter à des travaux de recherche sur un nombre plus important de patients. D'après les auteurs, les orientations futures consisteront à comparer ces marqueurs d'auto-anticorps avec des résultats neurologiques spécifiques, notamment les performances cognitives et l'imagerie cérébrale du volume de matière grise et de matière blanche.

En conclusion, la poursuite de travaux de recherche par analogie avec les lésions cérébrales d'origine traumatique reposant sur le dosage de marqueurs sériques de lésion neuronale permettrait d'objectiver une éventuelle agression chimique. Proche de l'évènement supposé, il pourrait être envisagé de doser le GFAP (Pringle *et al.* 2018) ou d'autres biomarqueurs sériques en fonction de l'évolution des connaissances (Reddy, Shewokis et Izzetoglu 2022) ; à distance de l'évènement, ou en l'absence de caractérisation d'un évènement, avec de rechercher des auto-anticorps anti-protéines spécifiques, de classe IgG (Abou-Donia, Lieberman et Curtis 2018).

4.4.6 Conclusion

Le « Syndrome aérotoxique » n'est pas une entité nosologique reconnue de façon consensuelle et internationale. Le terme « Syndrome aérotoxique » a été intentionnellement inventé par seulement quelques auteurs afin d'alerter les pouvoirs publics et les industries de l'aéronautique sur la relation pouvant exister entre « *fume events* » et les effets sanitaires chez le personnel navigant. Il a été montré que seulement quelques personnes exposées développaient des troubles incapacitants. Les signes cliniques et les symptômes présentés par les personnels navigants ne sont pas remis en cause, mais constituent une liste au très large spectre ; ils sont non spécifiques, le plus souvent subjectifs et rendent difficile la caractérisation d'un syndrome spécifique pouvant toucher les personnels navigants. Le terme « aérotoxique » est inadéquat en l'état actuel des connaissances, car il n'a pas pu être mis en évidence de lien de causalité avec un polluant de l'air donné.

Il existe très probablement des facteurs de susceptibilité individuelle, génétique (Cytochrome P450, autres enzymes de détoxification, etc.) et/ou une susceptibilité environnementale (exposition préalable ou simultanée à d'autres polluants (ex : COV, HAP, particules..., etc.)). Il ressort des études sur la recherche de biomarqueurs que :

- La mesure sanguine de l'activité des cholinestérases dans les cas d'intoxications aiguës par les organophosphorés manque de sensibilité, dans le cas d'une exposition à de faibles doses et manque également de détermination d'une valeur basale. Par ailleurs, une absence d'inhibition ne signifie pas qu'il n'y a pas eu exposition à un organophosphoré.

La recherche d'adduits sur les cholinestérases, ou sur d'autres protéines sanguines, par des méthodes plus sensibles de spectrométrie de masse, serait plus sensible pour mettre en évidence l'exposition, sans toutefois pouvoir établir un lien de cause à effet.

- Seule, l'activité de la Neuropathie Target Esterase (NTE) lymphocytaire semble établir un lien avec une exposition à un organophosphoré, jusqu'à quelques jours après l'exposition, sans que cela ne soit significatif dans la seule étude de cas, considérant le peu de sujets (11 personnels navigants).
- Concernant les marqueurs de lésion cérébrale, le dosage d'auto-anticorps anti-protéines spécifiques, de classe IgG montre des titres élevés chez des personnels navigants atteints d'OPIDN ou d'OPICN sans qu'il soit possible d'en déterminer l'origine. En effet, cette augmentation peut être liée à des expositions répétées à des polluants chimiques, mais également des traumatismes cérébraux ou à des infections encéphaliques.

Ces recherches s'inscrivent notamment dans l'objectivation d'une exposition à certains organophosphorés dans l'air de la cabine. Néanmoins, une telle exposition est faible lorsqu'elle est mesurée et ne semble pas entraîner de signe clinique. Une exposition pourrait être cependant mise en évidence, dans le sang, par la présence d'adduits protéine sérique-métabolite d'organophosphoré. En cas d'installation de signes cliniques neurologiques et/ou

dans un but de suivi médical des personnels navigants, la recherche et le dosage sériques d'auto-anticorps neuronaux pourraient être effectués (Abou-Donia, Lieberman et Curtis 2018; Arneith 2019). Des recherches devraient être envisagées afin d'évaluer l'utilité des dosages sériques de protéines neuronales ou gliales (GFAP, etc.), dont les concentrations sériques se trouveraient possiblement augmentées en cas de lésions par organophosphorés ou par tout autre composé chimique (Pringle *et al.* 2018; Reddy, Shewokis et Izzetoglu 2022).

Il convient de noter cependant que les auteurs traitant du syndrome aérotoxique font systématiquement le lien entre les divers symptômes rapportés par les personnels navigants et des *fume events*, sans rechercher d'autres causes possibles d'expositions spécifiques à l'environnement des cabines d'avions. Il convient toutefois de ne pas se focaliser uniquement sur les *fume events*, comme source potentielle de composés nocifs pour la santé des personnels navigants et des passagers. En effet, de nombreux polluants chimiques, présents dans l'air des cabines d'avions, ressortent de l'état des connaissances sur la qualité de l'air réalisé dans la présente expertise (cf. chapitre 5). De plus, la voie respiratoire, même si elle doit être privilégiée, ne doit pas écarter la possibilité d'autres voies d'exposition ; par contact avec le derme ou par ingestion, les polluants pouvant se déposer sur les surfaces.

Le « syndrome aérotoxique » regroupant une large gamme de symptômes aspécifiques, il est difficile d'établir un protocole médical de diagnostic, il est néanmoins nécessaire de pouvoir objectiver ces troubles cliniques pour pouvoir mettre en œuvre une prise en charge médicale adaptée.

L'objectif de ces travaux d'expertise n'était pas de proposer une démarche de diagnostic pour des personnes déclarant des symptômes après une exposition à un événement CAC. Toutefois, le groupe de travail a identifié dans la littérature scientifique et grise des protocoles médicaux ou des examens complémentaires de nature à guider au mieux sur les pistes de prise en charge.

Ainsi Hageman, Pal, Nihom, Mackenzie Ross et Berg (2020) ont proposé des critères en comparant les troubles neurologiques du probable « syndrome aérotoxique » à l'encéphalopathie toxique chronique induite par les solvants. Tout récemment, Burdon *et al.* (2023) ont proposé un arbre décisionnel associé à des protocoles de recueils d'information et d'examens médicaux pouvant être conduits en fonction de la symptomatologie des patients.

Plusieurs parties prenantes ont proposé des éléments de diagnostic ou d'objectivation des symptômes présentés par les personnels navigants suite à un événement CAC : le comité européen de normalisation, dans un rapport technique de 2022 (CEN 2022), l'association internationale du transport aériens (IATA) en 2017 (IATA 2017) et le consortium de recherche en santé au travail dans l'aviation (OHCRA), mené par l'Université de l'Oregon et financé par la FAA (OHRCA 2009).

Ces éléments de diagnostic peuvent être considérés comme des pistes à explorer, même s'ils ne constituent pas un protocole formel que le groupe de travail recommande d'appliquer. En effet certains éléments, comme la pertinence de l'utilisation des biomarqueurs d'exposition mesurant l'activité des cholinestérases font débat (Cf. chapitre 4.4.5.1).

5 État des connaissances sur les polluants chimiques et composés particuliers dans l'air des cabines d'avions

5.1 Objectif

L'objectif de cette partie est de présenter un état des connaissances relatives à la qualité de l'air dans les cabines d'avions. Il s'agit d'identifier d'une part les différentes sources de pollution de l'air, et d'autre part de documenter les polluants présents dans l'air des cabines (nature, concentration). Le fonctionnement de la ventilation de la cabine d'avion et du cockpit est également brièvement décrit pour comprendre et discuter de la présence de certains composés dans l'air des cabines d'avions.

Compte tenu du contexte de la saisine, un focus est également effectué sur la problématique des épisodes de contaminations de l'air de la cabine par le système d'alimentation en air de l'avion (*bleed air*), communément appelés « *fume event* ».

5.2 Méthodologie

Afin de documenter les données relatives à la qualité de l'air en cabine (sources, polluants, concentrations), une revue de la littérature scientifique et de la littérature grise a été effectuée selon les recommandations de l'Anses (cf. chapitre 2.2).

Identification des références disponibles

Pour rechercher les études traitant de la problématique de la qualité de l'air dans les cabines et cockpit d'avion, la question de recherche a été formulée à partir de la structure PECO, adaptée à la problématique :

- Population (ou sujets étudiés) / lieux étudiés : Cabine ou cockpit des avions
- Exposition : Substances, particules, odeurs, sources de polluants
- Comparateur : Autres environnements intérieurs
- Outcome : sans objet
- Temporalité (période de recherche) : aucune

La revue de la littérature a été effectuée à l'aide des bases de données PubMed® et Scopus®, à partir de 4 équations de recherche, schématisées sur la Figure 9.

Les mots clés ont été recherchés pour les requêtes 1 et 2 dans les titres et abstracts et pour les requêtes 3 et 4 dans les titres, abstracts et mots clés. Cette recherche a été complétée par une recherche dans Google Scholar, uniquement dans les titres, à l'aide des mots clés suivants: *aircraft - airplane - airliner - cabin -cockpit - indoor / air quality / bleed air - odor - odour- smell / measurement - monitoring - sampling - concentration - exposure - source - emission*. Ces requêtes ont généré 983 références via Scopus, 213 via Pubmed et 144 via Google Scholar (dernière recherche effectuée le 4 janvier 2022 + veille bibliographique). Le détail des requêtes est présenté en Annexe 11.

En complément, une recherche de référence au travers de la littérature grise a été effectuée en consultant les sites internet de différents organismes techniques, 34 références ont été identifiées. La veille bibliographique réalisée entre le 4 janvier 2022 et le 1er juin 2023 n'a pas mis en évidence d'articles complémentaires.

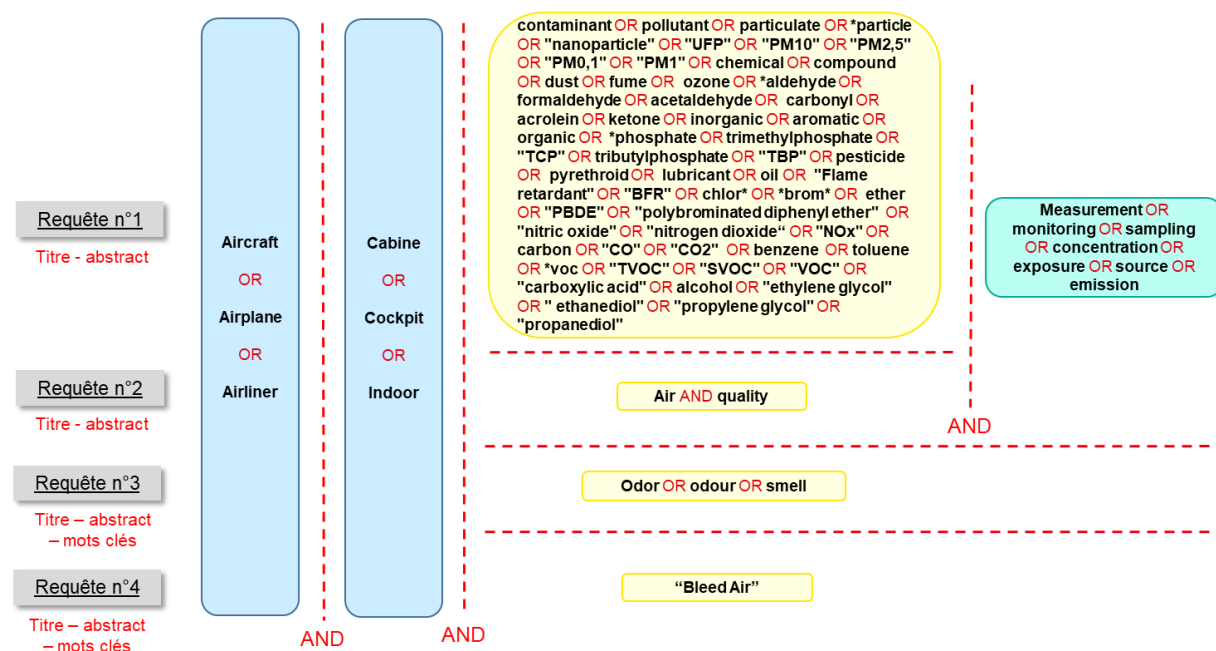


Figure 9 : représentation schématique des requêtes bibliographiques réalisées pour l'état des connaissances sur la qualité de l'air

Sélection des données pertinentes

Un premier tri effectué sur titre et abstract a permis de sélectionner 193 références présentant des données de mesures de polluants en cabine / cockpit (données concentration, identification, source, etc.). Les 738 autres références ont été exclues pour les raisons suivantes :

- Absence de mesures de polluants en cabines/cockpit, ou de discussion/informations sur les polluants dans les cabines/cockpit d'avion (même de manière qualitative) ou absence d'études/discussion sur les sources de pollution dans les cabines/cockpit d'avion
- Etudes relatives aux biocontaminants, bruit, vibration, lumière, conditions de température, pression, humidité, incendie, transport d'armes chimiques dans les avions militaires, éléments constitutifs de l'avion (résistance technique, corrosion, fonctionnement du *bleed air* (sans mention de pollution dans la cabine), etc.)
- Etudes descriptives du fonctionnement général des filtres HEPA sans analyse des composés retenus par ces filtres utilisés dans les avions,
- Etudes descriptives du développement ou de l'utilisation de capteurs de polluants (CO ou autres) sans essais dans les cabines/cockpits.
- Etudes de modélisation, simulation de la ventilation/climatisation sans lien avec des polluants
- Articles dans des langues autres que le français ou l'anglais
- Recueils d'actes de conférences

Les références ne présentant pas d'intérêt pour la qualité de l'air (pas de mesure de polluants ou discussion sur les sources) mais présentant un intérêt potentiel pour la partie « effets

sanitaires » ont été écartées pour la question « qualité de l'air » mais évaluées pour la partie 4.

Confirmation de l'éligibilité des données sélectionnées et évaluation de la qualité des données éligibles.

Pour l'étape d'éligibilité (confirmation de la pertinence des références identifiées) et l'étape d'inclusion (évaluation de la qualité des données et des études et du risque de biais), les études, après lecture du texte intégral, ont été classées selon le type d'études : revues/articles originaux/actes de conférence, puis triées par dates.

Les revues ont été relues en priorité. Deux revues de synthèse récentes présentant un état des connaissances relatives à la qualité de l'air dans les cabines/cockpit d'avions ont été identifiées : R. Chen, Fang, *et al.* (2021) et Hayes *et al.* (2021). La qualité méthodologique de ces revues a été analysée selon la méthode Amstar 2 (Cf. Annexe 2). A noter que cette grille de cotation a été adaptée car les critères d'évaluation sont très orientés pour les essais cliniques et certains ne sont pas adaptés à l'analyse d'études métrologiques ou d'exposition. Ces derniers critères n'ont donc pas été évalués. Les deux revues ont été jugées de bonne qualité et retenues pour la synthèse des données. Lors de l'analyse des revues de R. Chen, Fang, *et al.* (2021) et de Hayes *et al.* (2021), le choix a été fait de ne s'intéresser qu'aux études effectuées lors de vols non-fumeurs.

Ces deux revues étant récentes, le groupe de travail a souhaité compléter les données disponibles de la façon suivante ;

- Les articles publiés après 2019, date des derniers articles recensés dans ces deux revues, ont été relus en texte intégral afin de vérifier si les sources ou polluants investigués étaient identiques à ceux rapportés par les deux revues et si les gammes de concentrations des polluants rapportées dans ces études étaient similaires. Le cas échéant les résultats contradictoires ou complémentaires sont discutés dans la partie synthèse des données. Sept articles ont ainsi été inclus (Yin *et al.* 2021 et Yin *et al.* 2022, Pang *et al.* 2020, Michaelis, Loraine et Howard 2021, Yu *et al.* 2021, J. He *et al.* 2021, Rivera-Rios *et al.* 2021).
- Les articles antérieurs à 2019, non déjà pris en compte dans les 2 revues de synthèse (R. Chen, Fang, *et al.* 2021 et Hayes *et al.* 2021), ne sont retenus que s'ils apportent des informations complémentaires aux données rapportées dans celles-ci, et notamment s'ils permettent de renseigner sur des mesures réalisées au cours d'évènements de type « *fume events* », sur d'autres polluants ou si les données de concentrations rapportées se situent dans des gammes différentes de celles mentionnées dans les revues. Aucune étude rapportant des résultats de mesure en vols au cours desquels des *fume events* auraient été rapportés n'a été identifiée. Cinq études complémentaires ont été incluses (Mizukoshi *et al.* 2018, Mizukoshi *et al.* 2019, Targino, Machado et Krecl 2017, Omana *et al.* 2016, Li *et al.* 2014, Berger-Preiß *et al.* 2004, Christiansson *et al.* 2008).
- Les 7 références issues de la littérature grise sélectionnées ont fait l'objet d'une lecture intégrale, et les données rapportées (données de mesures de composés chimiques dans l'air - TCP, retardateurs de flamme, caractérisation chimique des huiles et vapeurs d'huiles), ont été prises en compte pour établir l'état des lieux des connaissances relatives à la qualité de l'air dans les cabines d'avions (ACER 2010b,

ACER 2010a, ACER 2012, OHRCA 2014, (CEN 2022, EASA 2017a, European Commission 2020a).

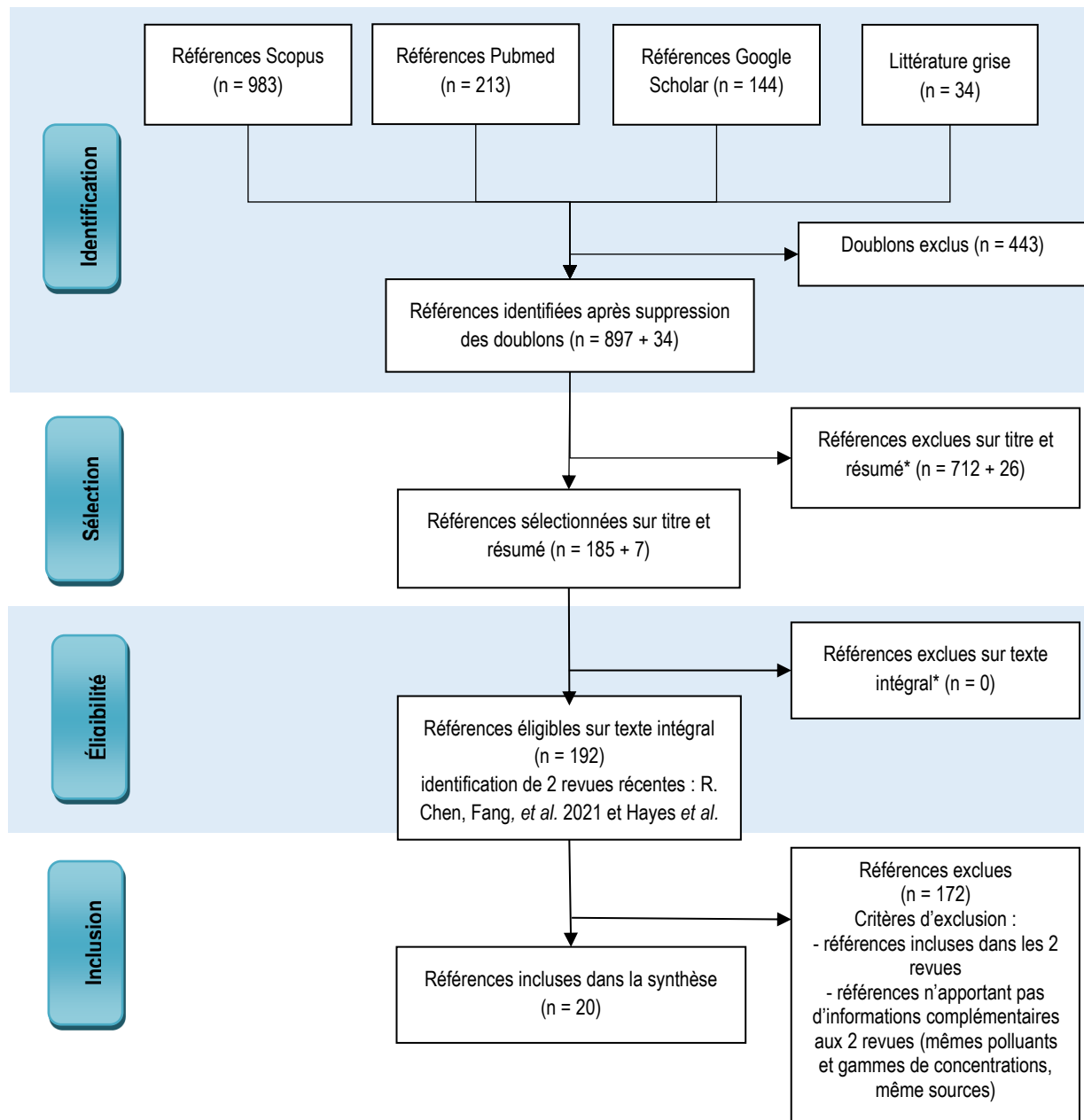


Figure 10 : diagramme Prisma

5.3 Lignes directrices et paramètres généraux de la qualité de l'air dans les cabines

La navigabilité des avions est établie et maintenue dans le cadre d'un contexte réglementaire international. L'agence européenne de la sécurité aérienne (EASA) et l'agence gouvernementale chargée des réglementations et des contrôles concernant l'aviation civile aux États-Unis (FAA) ont défini des exigences relatives au processus de certification des avions commerciaux dont le poids est supérieur à 5700 kg (dénommés « gros avions ») qui

sont précisées respectivement dans le CS-25 (EASA 2021) et dans le code des règlements fédéraux (*Code of federal regulations*) des États-Unis (14 CFR Part 25 : *Airworthiness Standards: Transport Category Airplanes*).

Ces exigences portent sur différents éléments techniques et réglementaires, nécessaires à la construction, la modification, la réparation des aéronefs (structure, cabine, avionique, systèmes et moteurs).

Concernant la qualité de l'air des cabines/cockpit d'avions, l'EASA et la FAA ont fixé des valeurs limites pour différents paramètres de la qualité de l'air, dont trois composés chimiques : l'ozone (O₃), le monoxyde de carbone (CO) et le dioxyde de carbone (CO₂). Des conditions de pression sont également définies (Tableau 14).

Tableau 14 : Lignes directrices pour différents paramètres de la qualité de l'air en cabine/cockpit d'avion

Paramètre	Valeur	Source
Renouvellement d'air	0,25 kg d'air frais par minute/ occupant en phase de vol normale (c'est-à-dire 10 pieds cubes par minute d'air à une altitude pression de 8 000 pieds et à une température de cabine de 24°C) En cas d'incident, l'apport d'air frais ne doit pas être inférieur à 0,18 kg/min/pers pendant toute période dépassant cinq minutes.	EASA CS 25.831 Annex to ED Decision 2021/015/R FAA 14 CFR 25.831
CO	50 ppmv ¹⁶ soit 58,2 mg.m ⁻³ à 20°C et 1013 hPa.	EASA CS 25.831 FAA 14 CFR 25.831
O₃	0,25 ppmv(*) soit 0,5 mg.m ⁻³ à 20°C et 1013 hPa à tout moment au-dessus du niveau de vol FL320 ¹⁷ (32 000 pied ou 9 750 m); 0,1 ppmv soit 0,2 mg.m ⁻³ à 20°C et 1013 hPa, moyenne pondérée dans le temps pendant tout intervalle de 3 heures au-dessus du niveau de vol 270 (27 000 pied ou 8 250 m).	EASA CS 25.832 FAA 14 CFR 25.832
CO₂	0,5% (*) dans les compartiments normalement occupés par des passagers ou des membres d'équipage	FAA 14 CFR 25.831
Pression	L'altitude cabine ¹⁸ maximale ne doit pas dépasser 2438 m (8000 ft) à l'altitude maximale d'exploitation de l'avion dans des conditions d'exploitation normales. Si la certification pour une exploitation au-dessus de 7620 m (25 000 ft) est demandée, l'avion doit pouvoir maintenir une altitude pression cabine ne dépassant pas 4572 m (15 000 ft) en cas de défaillance ou de mauvais fonctionnement raisonnablement probable du système de pressurisation	EASA CS 25.841 FAA 14 CFR 25.841
Température		FAA 14 CFR 25.831

¹⁶ Les concentrations de monoxyde de carbone supérieures à 1 partie sur 20 000 parties d'air sont considérées comme dangereuses (EASA CS 25.83, FAA 14 CFR 25.831).

¹⁷ Un niveau de vol est en aéronautique une altitude exprimée en centaines de pieds au-dessus de la surface isobare 1 013,25 hPa.

¹⁸ L'altitude cabine désigne la pression à l'intérieur de la cabine. Au niveau de la mer, l'altitude cabine est de 0 m et la pression de 1013 hPa. Une altitude cabine de 2438 m correspond à une pression d'environ 752 hPa. Une altitude cabine de 4572 m correspond à une pression d'environ 572 hPa.

Paramètre	Valeur	Source
Hygrométrie	<p>Ni l'EASA ni la FAA ne précisent de conditions de températures ou d'humidité pour un fonctionnement normal. La FAA mentionne que la durée d'exposition à une température donnée ne doit pas dépasser les valeurs indiquées dans le graphique suivant, après toute condition fortuite de défaillance</p> <p style="text-align: center;">Humidity < 2700 N/m² (27 mbar) Vapor Pressure</p> <p style="text-align: center;">TEMPERATURE</p> <p style="text-align: center;">TIME - MINUTES TIME - TEMPÉRATURE RELATIONSHIP</p>	
	(*) à 25° C et 1 013,2 hPa	

Concernant les paramètres de température et d'humidité relative, ni l'EASA ni la FAA ne précisent de conditions de températures ou d'humidité pour un fonctionnement normal.

Les plages de température et d'hygrométrie moyenne habituellement rencontrées sont respectivement de 17 à 35°C (Giaconia, Orioli et Di Gangi 2013; R. Chen, Fang, *et al.* 2021) (moyenne d'environ 24 °C) et 0,9 à 77% (moyenne environ 16% R. Chen, Fang, *et al.* 2021).

En France, ni le code des transports ni le code de l'aviation civile ne préconisent de lignes directrices particulières relatives à la qualité de l'air en cabine d'avions. De même aucune valeur limite réglementaire ou condition particulière pour la santé et la sécurité du personnel navigant en lien avec la qualité de l'air dans les cabines ou cockpit d'avions n'est définie. Cependant, selon l'article L6521-6 du code des transports, « le code du travail est applicable au personnel navigant de l'aéronautique civile et à leurs employeurs, sous réserve des dispositions particulières fixées par le présent titre¹⁹ ». Ces dispositions particulières concernent uniquement les conditions d'exercice (âge limite, contrat de travail, durée de travail, congés, protection sociale et retraite). Ainsi les mesures de prévention des risques chimiques précisées dans le Code du travail (Articles R4412-1 à R4412-160) s'appliquent et notamment les valeurs limites d'exposition professionnelle.

5.4 Sources de pollution de l'air en cabine ou cockpit

Du fait de leur conception (aération, ventilation, matériaux), des activités et de l'environnement dans lequel les avions circulent, l'air de leur cabine est susceptible d'être contaminé. Cette partie décrit le fonctionnement de la ventilation de la cabine et du cockpit d'un avion puis les sources pouvant être à l'origine d'une contamination de l'air.

¹⁹ TITRE II : Le personnel navigant professionnel (Articles L6521-1 à L6527-10)

5.4.1 Fonctionnement de la ventilation de la cabine et du cockpit d'un avion

L'air fourni au cockpit et à la cabine d'un avion pressurisé en vol passe par un système de contrôle environnemental (ECS). L'ECS vise à fournir un débit d'air suffisant pour assurer une pression partielle d'oxygène répondant aux besoins physiologiques de l'équipage et des passagers et empêche l'accumulation de niveaux excessifs de dioxyde de carbone (CO₂) dans la cabine. Les exigences de conception de l'ECS sont spécifiées par les autorités réglementaires. L'ECS est également conçu pour assurer une température de l'air homogène dans toute la cabine.

Deux conceptions différentes sont retrouvées sur les avions commerciaux de passagers :

- ECS avec *bleed air* : c'est le plus couramment rencontré
- ECS sans *bleed air* (également appelé ECS électrique)

L'air de la cabine de la plupart des grands avions de transport est alimenté en vol par l'air prélevé dans les parties basse et haute pression des moteurs (*bleed air*) et, au sol, par l'air prélevé dans le groupe auxiliaire de puissance (APU).

Dans le cas de l'ECS avec *bleed air*, l'air extérieur est prélevé dans un étage de compresseur du moteur ou de l'APU, en amont de l'étage de combustion, et acheminé vers le groupe de conditionnement d'air (PACK). Cet air est généralement à une pression et une température élevées. L'objectif du groupe de conditionnement d'air est d'amener l'air purifié à une température et une pression appropriées pour maintenir les conditions souhaitées dans la cabine. L'air conditionné est mélangé avec l'air de recirculation de la cabine. Le but de l'air de recirculation est de permettre une réduction du débit d'air extérieur, et économiser du carburant, tout en maintenant les débits d'air souhaités dans l'habitacle pour assurer une distribution uniforme de la température, un mélange approprié du CO₂ et des niveaux d'humidité accrus. L'air mélangé est envoyé dans la cabine. La pression de la cabine est principalement contrôlée par la modulation d'une ou plusieurs vannes d'évacuation placées sur le fuselage de l'avion, souvent à l'arrière de l'avion. Il existe d'autres sources d'évacuation de l'air, y compris, mais sans s'y limiter, les sorties de ventilation de l'avionique, des batteries, des toilettes et des cuisines. En général, 50 à 60 % de l'air de la cabine est évacué par la soupape de sortie et l'air restant est recyclé.

Pendant les opérations au sol, l'air fourni à l'ECS est soit l'air de prélèvement des moteurs, soit l'air de prélèvement de l'APU, soit l'air d'alimentation de la ventilation au sol à basse pression, soit l'air d'alimentation de la ventilation au sol à haute pression. Le groupe de conditionnement d'air est entraîné pneumatiquement par l'air de prélèvement qui le traverse. (CEN 2022).

L'air présent dans une cabine d'avion pressurisée est donc une combinaison d'air d'appoint provenant des moteurs et d'air recyclé.

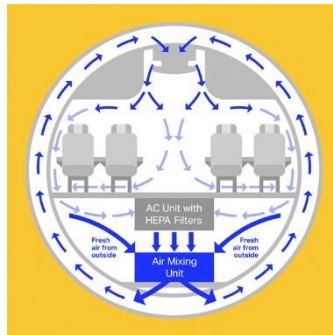
L'APU est un petit turboréacteur embarqué, situé en général à l'arrière du fuselage, qui permet essentiellement à l'avion d'être autonome en escale pour l'air (compresseur haute pression) et l'électricité. C'est une source alternative d'alimentation électrique et également de *bleed air*. Mais contrairement à l'ECS, il ne sert pas à propulser l'avion (génération de poussée²⁰). Il consomme moins de carburant que les moteurs et est principalement destiné à une utilisation au sol, bien que la plupart des APU puissent également être utilisés en vol comme deuxième source d'énergie électrique si la génératrice du moteur est en panne, ou source d'air de

²⁰ La poussée est l'élan vers l'avant créé par les hélices ou les moteurs à réaction de l'avion qui repoussent l'air vers l'arrière.

prélèvement si les purges sont fermées sur les moteurs afin de générer plus de poussée. (<https://aertecsolutions.com/en/2015/05/11/the-apu-and-its-benefits/>)

Sur certains avions, le *bleed air* ou l'air en provenance de l'APU peuvent également servir à pressuriser le système d'alimentation en eau potable, et fournir de l'air dans les conduits anti-givrage.

Il n'existe pas systématiquement d'unité de filtration pour éliminer les particules ou les composés organiques volatils (COV) du *bleed air* avant qu'il ne pénètre dans la cabine. Toutefois, la plupart des avions sont équipés de systèmes de filtres de particules à haute efficacité (HEPA) utilisés pour filtrer l'air de recirculation (environ 40 à 60 % d'air recyclé), permettant de retenir jusqu'à 99,95% des particules de diamètre supérieur à 0,3 micromètres. Pour que la ventilation de la cabine de l'avion soit efficace, le taux de renouvellement de l'air total dans l'avion est généralement supérieur à 20 fois par heure. Selon le type d'avion, il existe des différences dans la distribution de l'air de prélèvement. Certaines zones, par exemple le cockpit, peuvent être alimentées à 100 % en air de prélèvement (par exemple, dans le B757-300) ou avec un mélange d'air de prélèvement et d'air recyclé (par exemple, dans l'Airbus A380 et la série A320) (EASA 2017b).



(source IATA : <https://www.iata.org/en/youandiata/travelers/health/low-risk-transmission/>)

Dans ce cas d'un ECS sans *bleed air*, l'air extérieur est prélevé directement à l'extérieur de l'avion *via* une entrée dédiée et un compresseur électrique.

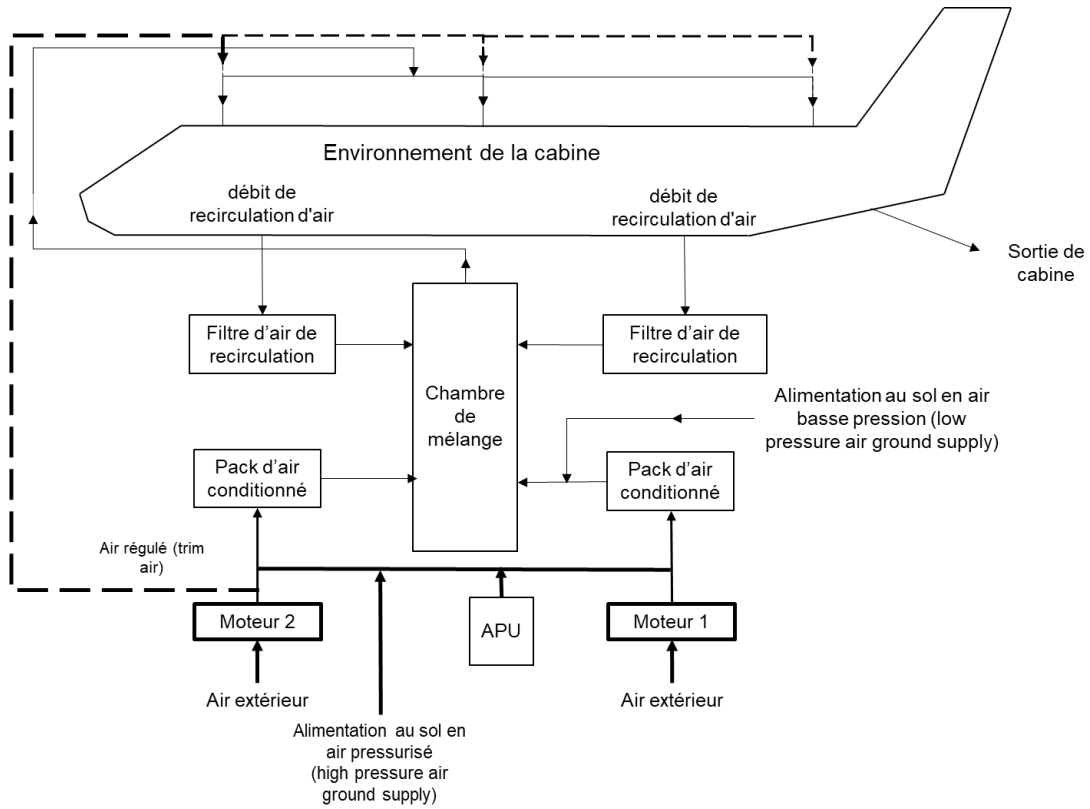


Figure 11 : ECS avec bleed air (source CEN 2022)

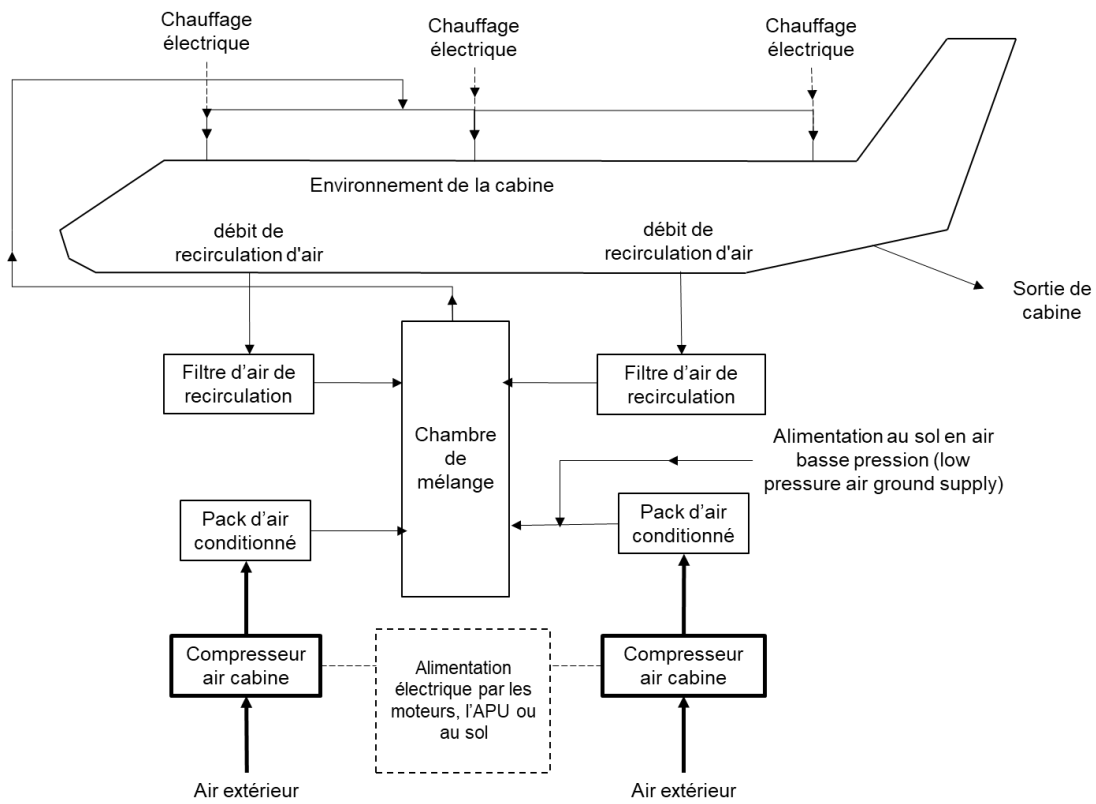


Figure 12 : ECS sans bleed air (source CEN 2022)

5.4.2 Sources potentielles

Les sources potentielles de polluants dans les cabines d'avions peuvent être liées aux matériaux présents dans les cabines d'avion, au fonctionnement de l'avion et notamment au système de ventilation, aux opérations réalisées au sol et en vol, à des dysfonctionnements ou externes à l'avion (trafic aéroport, etc.).

Le schéma suivant illustre les différentes sources possibles de contamination de l'air des cabines d'avions (Figure 13).

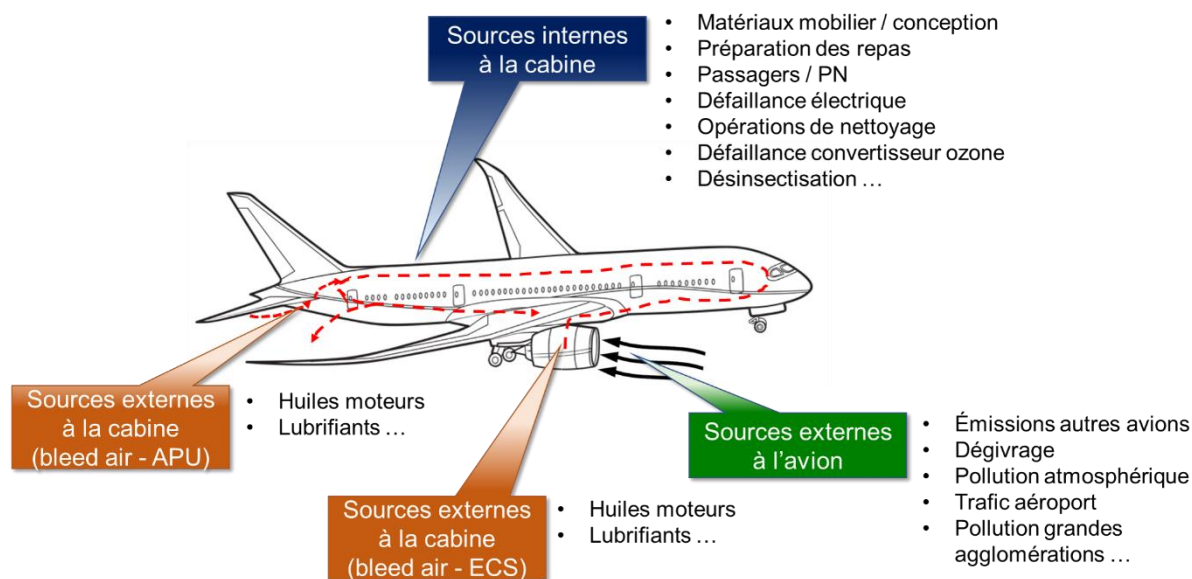


Figure 13 : schéma illustratif des sources potentielles de pollution de l'air des cabines/cockpit d'avions

Ces sources, ainsi que leur impact potentiel sur la qualité de l'air dans les cabines (en terme de composés chimiques) ont été listées par l'EASA en 2017 (EASA 2017b) et plus récemment par le comité européen de normalisation (CEN 2022) (Tableau 15).

Tableau 15 : Sources potentielles de contamination de l'air des cabines (source EASA 2017b, CEN 2022)

Sources potentielles	Cause potentielle de contamination	Impact potentiel (Composés chimiques potentiellement associés à ces sources)
Fluides hydrauliques	Rupture de conduites d'alimentation en fluide hydraulique Pratiques d'entretien (remplissage excessif du réservoir hydraulique)	Phosphate de tributyle (TBP), phosphate de triisobutyl (TiBP), phosphate de triphényle (TPP), résines époxy, etc.
Huiles moteur	Fuites au niveau des joints ou des roulements dégradés ou défectueux dans le moteur/APU, Pratiques d'entretien (par exemple, remplissage excessif du réservoir d'huile) Conduits et composants de l'ECS souillés.	phosphates de tricrésyle (TCP), phosphate de trixylyle (TXP), autres phosphates (Cf. fiche de donnée de sécurité des huiles utilisées), amines (par exemple phényl naphthylamine), formaldéhyde, toluène, particules ultrafines, etc.

Sources potentielles	Cause potentielle de contamination	Impact potentiel (Composés chimiques potentiellement associés à ces sources)
Lubrifiants		Huile de base, organophosphates, matières organiques particulaires
Trafic aérien à l'aéroport / gaz d'échappement Démarrage du moteur pendant le remorquage	Aspiration des gaz d'échappement des avions en service ou des véhicules/équipements de service au sol via l'air d'alimentation (probabilité accrue dans les aéroports très fréquentés, en particulier pendant les files d'attente pour le décollage).	Gaz d'échappement (par exemple, CO, CO ₂ , NO _x , carburant, particules), aldéhydes, toluène, xylènes, O ₃
Trafic automobile à l'aéroport	Remarque : l'ozone peut être généré lorsque les NO _x et les hydrocarbures des gaz d'échappement réagissent entre eux en présence de la lumière UV.	
Carburant (non brûlé) et vapeur	Aspiration dans l'entrée de l'APU de déversements et vapeurs de carburant	Distillat de pétrole, xylènes
Pollution industrielle/aéroportuaire, nuages d'éruptions volcaniques	Via l'air d'alimentation lors de vols à l'intérieur ou à l'extérieur de zones urbaines polluées et de tout environnement aéroportuaire et/ou lors de vols à travers des nuages d'éruptions volcaniques.	NO _x , O ₃ , particules, composés contenant du soufre
Oiseaux	Ingestion dans les moteurs de l'avion	matière organique, carbone, matières particulaires
Ventilateurs	(Largement utilisés à bord, notamment dans le système de ventilation, la cuisine et le poste de pilotage). Pannes de ventilateurs : surchauffe ou combustion de l'isolation des fils, roulements défectueux, graisses d'entretien.	NO _x , O ₃ , particules (y compris les métaux), COV provenant de l'isolation des fils, graisse à base de bisulfure de molybdène
Freins et pneus	Via l'air d'alimentation lors des périodes de toucher au sol	Hydrocarbures aromatiques, particules ultrafines
Absence de convertisseur d'ozone	Concentrations élevées d'ozone dans la stratosphère, notamment à des latitudes/altitudes élevées .	O ₃ , en particulier en croisière. L'ozone peut également réagir avec d'autres composés présents dans l'air de la cabine, produisant des composés secondaires.
Passagers	Forte densité d'occupants expirant dans l'espace de la cabine, liée à un faible volume de dilution par personne	CO ₂ , COV, éthanol, acétaldéhyde, odeurs désagréables
Coupure de l'air de prélèvement pendant le démarrage du moteur		Augmentation de courte durée du CO ₂

Sources potentielles	Cause potentielle de contamination	Impact potentiel (Composés chimiques potentiellement associés à ces sources)
Emanations d'origine électrique (<i>electrical fumes</i>)	Défaillance d'éléments électriques dans la cabine (ex. systèmes de divertissement à bord, équipements de cuisine, électronique du poste de pilotage).	oxydes nitreux, O ₃ , particules, COV provenant de l'isolation des fils électriques
En cas de dégradation thermique		COV, acides organiques, aldéhydes, CO, CO ₂ , produits inconnus
Ameublement	Tissus d'ameublement, moquettes, mousse des coussins de siège et autres éléments de l'intérieur de la cabine ; Relargage de COV/monomères/pesticides à partir des matériaux neufs. Migration des composés dans la poussière pouvant être remise en suspension dans l'air.	COV/COV, particules de matière organique Retardateurs de flamme par exemple les organophosphates (ex. phosphate de tris(chloroéthyle), éthers diphenyliques polybromés et composés chlorés
Entretien, Nettoyage de la cabine en général	Utilisation de produits de nettoyage et désodorisants dans les toilettes, les cuisines et sur d'autres surfaces de la cabine	Divers COV par ex. alcools, arômes (terpènes), limonène, aldéhyde, lubrifiants, résidu de tétrachloroéthylène, solvants
Biocides / insecticides	Application de produits soit en réponse à l'observation d'insectes, soit pour se conformer aux réglementations internationales en matière de quarantaine.	typiquement, 2 % de perméthrine ou 2 % de phénothrine, solvants, propulseurs
Fluides/odeurs des toilettes	Produits de nettoyage et désinfectants, déodorants, abaisseur de point de congélation sans glycol, etc. déchets humains	Odeurs, COV des produits de nettoyage
Bagages à main	Migration de contaminants liquides ou gazeux à partir de sacs à main stockés dans les compartiments supérieurs ou sous les sièges aliments, articles de soins personnels, animaux, solvants, etc.	Composés chimiques, bactéries
Restauration / neige carbonique	Sublimation de la neige carbonique utilisée pour conserver les denrées périssables à basse température. Elle se sublime en de grandes quantités de gaz carbonique.	CO ₂

Les sources mentionnées dans ce tableau sont celles régulièrement évoquées dans la littérature scientifique ou la littérature grise. Cependant, les mesures de la qualité de l'air en cabine/cockpit sont très rarement réalisées lors de vols au cours desquels des événements

de contamination de la qualité de l'air des cabines ou *fume events* sont rapportés. De ce fait, l'origine des polluants détectés n'est pas clairement objectivée (Cf. partie 4.5). Certaines études ont donc été menées afin d'investiguer les sources de composés gazeux et particulaires de l'air des cabines d'avions (Cf. partie 5.4.5).

5.4.3 Terminologie relative aux « fume events »

Plusieurs termes sont utilisés dans la littérature scientifique, la littérature grise ou par les différentes instances représentant l'aviation civile, pour désigner les épisodes de contaminations de l'air des cabines d'avions.

Dans la littérature scientifique, le terme « *fume event* » a été utilisé pour désigner un environnement potentiellement toxique créé par le *bleed air* contaminé (Day 2015). Plus largement ce terme est utilisé pour désigner des épisodes d'odeurs, fumée ou brouillard accidentels à l'intérieur d'un avion, généralement imputés à une contamination du *bleed air* par des composés issus des huiles ou fluides hydrauliques pyrolysés, suite à des défaillances de joints dans le compartiment moteur ou à des fuites dans l'APU. Day *et al.* reviennent sur l'utilisation de ce terme qui, scientifiquement ne désigne pas nécessairement de véritables fumées, ces dernières étant définies comme des « aérosols de particules solides produits par la condensation de vapeurs ou de produits de combustion gazeux » (Hinds 1999).

Parmi les instances représentant l'aviation civile, l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI) définit dans la circulaire 344 AN/202 des lignes directrices sur les pratiques en matière d'éducation, de formation et de signalement des « *fumes events* » et précise les éléments suivants (OACI 2015) :

- **Fume(s)** : Composés gazeux odorants qui ne sont pas visibles. Il est précisé que dans le contexte de la circulaire, les émanations et les odeurs sont considérées comme étant synonymes, et le terme « émanation(s) » comprend à la fois les émanations et les odeurs.
- **Smoke** : Produit des matières en combustion rendu visible par la présence de petites particules.

L'association du transport aérien international (IATA) parle d'évènement en lien avec la qualité de l'air de la cabine (Cabin Air Quality Event) pour désigner les événements liés aux odeurs, à la fumée ou aux émanations qui peuvent se produire lorsque l'air de la cabine devient odorant ou (rarement) s'il est contaminé, par exemple par des traces d'huile, de fluide hydraulique ou d'autres agents provenant des moteurs ou de l'APU. Cet organisme définit également les termes suivants :

- *Fumes* : composés odorants, gazeux qui ne sont pas visibles
- *Smoke* : produit de la combustion de matériaux, rendu visible par la présence de petites particules.

Au niveau européen, l'EASA utilise plutôt le terme « d'évènement de contamination de l'air de cabine/cockpit » (*Cabin/Cockpit Air Contamination Event (CACE)*).

La FAA ne propose pas de définition pour un « fume event », mais a publié une alerte de sécurité pour les exploitants c'est-à-dire une procédure de traitement des odeurs, de la fumée et/ou des émanations en vol (*Odors, Smoke and/or Fumes in Flight*) pour mieux identifier certaines odeurs/émanations (*odor/fumes*) (FAA 2020)

En France, pour la DSAC/DGAC, les « *fume events* » regroupent les phénomènes de dégagement de fumées et/ou d'odeurs provenant du système de conditionnement d'air. Ces phénomènes se traduisent par des odeurs, des fumées ou des brumes contaminant la cabine des passagers ou le poste de pilotage. Parfois inconfortables, ces émanations peuvent dans des cas extrêmes être incapacitantes (DGAC-DSAC 2020). La terminologie « événements Fumées et Odeurs » ou « événement Feu Fumées ou bien encore événements « Feu Fumée Odeur (FFO) » est utilisée.

Plus récemment, le comité de normalisation CEN TC 436 a publié en novembre 2022 un rapport technique (CEN 2022) visant à fournir aux parties prenantes (fournisseurs, fabricants, opérateurs et personnel de l'aviation commerciale) des recommandations relatives à la qualité de l'air des avions civils en ce qui concerne les composés chimiques pouvant provenir entre autres de l'air de ventilation fourni à la cabine et au poste de pilotage. Ce rapport définit les « *fumes* » comme étant une émission odorante, gazeuse et/ou d'aérosols de composé(s) pouvant provenir des bouches de ventilation de la cabine/du cockpit et non visible. Ce document définit également un « *Fume event* ». Il s'agit d'un événement caractérisé par la présence de « *fumes* » dans la cabine, émanant des bouches d'air d'alimentation de ventilation, qui peuvent indiquer la présence d'une contamination spécifique de l'air d'alimentation de ventilation (par exemple, huile moteur, fluide hydraulique, fluide de dégivrage) provenant du moteur ou de l'APU ou y pénétrant. Il est également précisé que la présence de « *fumes* » et/ou d'aérosols dans la cabine peut émaner d'une source à l'intérieur de la cabine (par exemple foudres de l'office, défauts électriques) ou de source externe transitoire. Ce document recommande que le personnel navigant soit formé pour faire la distinction entre un *fume event* (considéré comme étant une contamination spécifique de l'air d'alimentation de ventilation) et les autres types de source de contamination.

Terminologie utilisée dans la suite du rapport :

Ces deux termes « *fume(s)* » et « *smoke* » peuvent être confondus et différentes traductions de ces termes anglophones ont été proposées. Au vu des différentes définitions rappelées précédemment, le terme « *fumes* » est utilisé pour des émanations qui sont identifiées par une odeur caractéristique et est donc clairement à distinguer des fumées qui sont désignées par le terme « *smoke* ».

L'expression « événement de contamination de l'air en cabine (événement CAC) » est considérée plus adaptée par le groupe de travail afin de désigner tout événement modifiant la qualité de l'air de la cabine peu importe la source à l'origine de cet événement ; ce type d'événement étant détecté soit via l'apparition d'odeurs inhabituelles ou de fumées, soit par des mesures. Ces événements CAC sont généralement répertoriés en aéronautique sous la mention « feu fumée odeur » (FFO).

Le terme *fume events* est gardé dans la description des études car il s'agit du terme utilisé par les auteurs des études.

5.4.4 Fréquence des évènements CAC

Les données recueillies ne permettent pas de fournir une fréquence d'occurrence précise des évènements CAC sur l'ensemble des vols.

Shehadi, Jones et Hosni (2016) a examiné en détail différentes bases de données aux États-Unis afin de déterminer la fréquence des incidents signalés liés aux fumées d'hydrocarbures à bord d'un large éventail d'avions commerciaux. Les incidents examinés dans cette étude comprennent les incidents liés à la fumée, aux odeurs d'huile, aux émanations et à tout symptôme pouvant être lié à l'exposition à une telle contamination, signalés par les membres d'équipage, entre 2007 et 2012, pour les transporteurs basés aux États-Unis pour les vols intérieurs et tous les vols internationaux qui ont commencé ou se sont terminés aux États-Unis. La fréquence des incidents a été normalisée en fonction du nombre d'avions, du nombre de vols et du nombre d'heures de vol pour chaque modèle afin de tenir compte des variations importantes du nombre d'avions de différents modèles.

Les résultats de cette étude ont montré que les incidents sont largement répandus parmi les principaux constructeurs et modèles d'aéronefs. Ces incidents se produisent dans l'ensemble de la flotte. Néanmoins, certains modèles d'avions présentent des fréquences d'incidents plus élevées, jusqu'à cinq fois la moyenne générale. La fréquence moyenne pour tous les modèles d'avions inclus était de 2,1 incidents pour 10 000 vols, et la fréquence la plus élevée pour un seul modèle était de 7,8 pour 10 000 vols. Il faudrait donc échantillonner des dizaines de milliers de vols pour obtenir un nombre significatif d'incidents et les caractériser. Bien que la sous-déclaration soit documentée et que ces fréquences soient probablement légèrement inférieures à la réalité, le nombre de vols requis reste important.

En France, la réglementation européenne impose que tout évènement de sécurité doit être notifié à l'autorité de sécurité, en plus du traitement par la compagnie aérienne. Sur les 70 000 évènements notifiés à la DSAC tous les ans, il y a environ 3000 évènements par an (2017 à 2019) pouvant être qualifié d'évènements CAC. Dans ces évènements, il y a beaucoup de causes disparates : le tabac (13 %), les odeurs de cuisine (22 %), par exemple il peut rester des résidus dans les fours, qui peuvent dégager des fumées, les appareils apportés par les passagers, comme les batteries externes qui peuvent se mettre à fumer... Il y a également dans ces 3000 notifications, des évènements liés au dysfonctionnement des systèmes de détection de fumées qui peuvent se déclencher, alors qu'il n'y a pas de fumée (Cf. Annexe 5).

Lors de son audition, le service médical d'Air France a rapporté une fréquence des fume events déclarés comprise entre 120 et 140 par an depuis 2018 (sauf années Covid), pour entre 1000 et 1300 vols par jour sous la bannière Air France (ce qui correspond à 3 évènements pour 10000 vols). Quatre-vingt-huit pourcents des évènements rapportés étaient des odeurs, 8% des fumées, 3% des feux et 2% d'autres types d'évènements. Les odeurs les plus fréquemment rapportées sont les odeurs de chaussettes mouillées et de plastique chaud.

5.4.5 Identification des sources de composés gazeux et particulaires

Certaines études ont été menées afin d'objectiver les sources de composés gazeux et particulaires de l'air des cabines d'avions. Ces études mettant en œuvre des simulations portent en grande majorité sur l'étude des composés chimiques émis dans la cabine d'avions via le *bleed air* et la dégradation des huiles moteurs ou fluides hydraulique. Mais certaines s'intéressent également à la problématique de la désinsectisation.

5.4.5.1 Composition des huiles de moteurs et des liquides hydrauliques

L'hypothèse la plus couramment avancée pour expliquer les phénomènes de *fume events* est l'hypothèse d'une contamination du *bleed air* due à une fuite d'huile moteur, de fluides hydrauliques ou de fluides de dégivrage, en raison de la nature des polluants mesurés en cabine/cockpit (EASA 2017b, Van Netten 1998, Van Netten 1999, Van Netten 2000; Michaelis 2010). Cette hypothèse a émergé en 1998, suite à un nombre croissant de plaintes de l'équipage concernant la qualité de l'air du BAe 146-200, notamment après un changement de fournisseur d'huile moteurs. Dans ce contexte, Christian van Netten s'est intéressé à la qualité de l'air de la cabine et au fonctionnement du système de climatisation de ce type d'avion (Van Netten 1998). Il s'est aperçu qu'il pouvait y avoir des fuites d'huile à deux niveaux du turbopropulseur que cette huile était dégradée thermiquement dans le convertisseur catalytique, en dioxyde de carbone et en eau, et qu'en cas de saturation de ce convertisseur, une certaine quantité d'huile et de monoxyde de carbone pouvait rentrer dans la cabine.

Van Netten a également cherché à mettre en évidence par ICP-MS la présence d'éléments traces métalliques dans les huiles moteurs et les liquides hydrauliques de jet (Van Netten 1999). Ces éléments variaient en fonction des fabricants. La plupart des éléments traces potentiellement toxiques n'étaient pas détectés, exception faite du cadmium, présent dans l'huile Mobil™ étudiée, juste au-dessus de la limite de détection. Les liquides hydrauliques contenaient plus de phosphore que les huiles lubrifiantes.

Van Netten s'est aussi intéressé aux produits qui résultent de la pyrolyse à 525°C de deux marques d'huile moteur (pyrolyse expérimentale et analyse par GC-MS) (Van Netten 2000). Il a été noté dans l'air ambiant :

- Une libération de CO₂
- Une libération de CO
- Un grand nombre de composés volatiles
- Des composés pyrolysés
- La présence de TCP

L'étude menée par l'EASA en 2017 dans le cadre du projet AVOIL sur la caractérisation chimique des huiles moteur/APU (voir partie 2.6), des vapeurs émises après chauffage et des vapeurs émises après pyrolyse confirme ces observations. Les résultats de cette étude sont les suivants (EASA 2017a) :

- L'huile usagée contient moins de fractions d'huile semi-volatiles et volatiles que les huiles neuves, ce qui entraîne une évaporation moindre.
- L'analyse des huiles originales a révélé que les phosphates de tri(m,m,m), de tri(m,m,p), de tri(m,p,p) ou de tri(p,p,p) étaient détectés dans toutes les huiles. Le phosphate de tri(o,o,o)-crésyle n'a pas été détecté dans les huiles.
- L'analyse des vapeurs d'huile a révélé que les quatre isomères du TCP (tri(o,o,o), tri(m,m,p), tri(m,p,p) et tri(p,p,p)) ont été détectés dans toutes les vapeurs d'huile dans la même composition que celle des huiles originales. Le phosphate de tri(o,o,o) crésyle n'a pas été détecté dans les vapeurs d'huile.

- L'essai de simulation a révélé que les huiles chauffées en régime permanent à $375 \pm 25^\circ\text{C}$ émettent davantage de TCP que dans la simulation où la température est portée de 20 à 350°C .
- Le test de simulation montre une bonne corrélation entre la composition des isomères de TCP trouvés dans l'huile d'origine et dans les vapeurs d'huile à différentes températures
- Les résultats de l'analyse des HAP dans la vapeur montrent un plus grand nombre de HAP que ceux trouvés dans les huiles originales. Ceci pourrait impliquer les hypothèses suivantes :
 - Il existe une possibilité de formation de HAP pendant le chauffage de l'huile et en raison d'une combustion incomplète,
 - Les HAP trouvés dans la vapeur peuvent provenir de faibles concentrations dans l'huile d'origine (concentrations inférieures à la limite de détection).
- Des concentrations élevées ont été trouvées dans les vapeurs d'huile pour le formaldéhyde et l'acétaldéhyde.
- Du début de l'essai de simulation jusqu'à ce que l'huile atteigne 180°C , il n'y a pratiquement aucune émission de CO. Il semble que lorsque la température de l'huile passe de 180 à 375°C , des émissions de CO se forment en raison d'une combustion incomplète de l'huile.
- 127 composés ont été identifiés dans les essais sous azote et sous oxygène.

5.4.5.2 Simulation de contamination du bleed air

Dans son étude FACTS, l'EASA a réalisé des essais en vol et au sol, avec différentes conditions et manœuvres visant à simuler un évènement de contamination du *bleed air* et évaluer l'impact de cette contamination sur la qualité de l'air du cockpit/cabine (Cf. partie 2.6) (European Commission 2020a).

Phase de test 1 : résultats des essais en vol

L'EASA rapporte qu'au cours de la 1^{ère} phase de test les concentrations les plus élevées en cabine et dans le cockpit ont été mesurées au cours de la phase de roulage avant décollage quel que soit le polluant mesuré.

En cabine, les concentrations en particules, carbone suie et PUF sont plus élevées lors du vol d'essai que lors du vol de référence, contrairement aux COV et aldéhydes. Les ratios les plus importants entre vol de référence et vol d'essai sont observés pour ces polluants, au cours de la phase de descente. Pour les organophosphates, le ratio le plus élevé est observé au cours de la phase de croisière.

En cockpit, moins de polluants ont été détectés, mais le constat est similaire.

Les auteurs ont effectué des corrélations entre les différents paramètres mesurés en temps réels. Au cours du vol de référence, ils observent :

- Une forte corrélation entre les paramètres suivants : différentes mesures de PUF, mesures de PUF cabine et cockpit, mesures de CO et PUF en cabine, concentration en CO et l'altitude, concentration en SO_2 et PM_{1-4} , concentrations en SO_2 et PUF, concentration en SO_2 et humidité relative, concentrations en SO_2 et COV, PUF et humidité relative, PUF et altitude.

- Une corrélation modérée entre les mesures de carbone suie et les PUF ce qui, selon les auteurs, tendraient à montrer que des sources différentes doivent être à l'origine des deux types de particules.
- Une corrélation négative modérée entre la température et les PUF.
- Une corrélation faible entre l'O₃ et l'altitude. Selon les auteurs cela pourrait être lié à un décalage temporel entre l'augmentation de la concentration et l'augmentation de l'altitude.
- Une corrélation négative forte entre PUF et COV et PUF/ Altitude

Et au cours du vol d'essai :

- Une corrélation forte entre les paramètres suivants : différentes mesures de PUF, PUF cabine/cockpit, BC cabine / BC cockpit, BC (cockpit et cabine) / PM10 à PM1,
- Une corrélation modérée entre BC et PUF et faible à modérée entre PUF et COV et PUF et altitude
- Une corrélation négative forte entre température et PUF

D'après les auteurs, l'augmentation des concentrations ne peut pas être directement reliée aux événements provoqués. Le contributeur majoritaire aux COV est le propylène glycol. Bien que de l'huile Turbonycoil sans TCP ait été utilisée pour les essais, des isomères de tri-m/p-crésyle ont été détectés dans l'air de la cabine et du cockpit, ainsi que dans les filtres de la zone de préparation des repas (galley filters). Aucun isomère mono-, di- ou tri-ortho de TCP n'a été observé.

La composition des isomères m/p dans tous les filtres de la zone de préparation des repas présentait des profils similaires, mais complètement différents de ceux observés pour les marques typiques d'huile moteur. D'autres sources dans ou autour de l'avion doivent donc être prises en compte.

Les auteurs ne font pas de commentaires sur l'ensemble des résultats, mais n'en commentent qu'une partie. Même si les résultats semblent montrer une plus forte concentration pour certaines phases, la plupart des mesures sont inférieures aux limites des détections et se situent dans l'incertitude globale de ce type de mesure. Il est donc difficile de conclure réellement. Les rares événements identifiés ont été confirmés uniquement pour les PUF.

Phase test 2 : résultats des essais au sol

Le tableau suivant (Tableau 16) résume les principaux résultats rapportés par les auteurs.

Tableau 16 : FACTS - Résultats de la phase test 2

Substance / paramètre (méthode)	Types de mesures	Référence	Evènement provoqué	Variation	remarques
PUF	Mesures en continu en temps réel (à l'aide d'un EEPS ou d'un partector 2)	$2 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$	Concentration maximale = $2,8 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ (EEPS) et $1,5 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ (Partector 2).	Cabine : ↗	Distribution granulométrique principalement particules < 20 nm. Augmentation du nombre de particules pour chaque intervalle de taille, plus particulièrement pour les particules les plus petites. Maximum de particules enregistrées pour taille de diamètre similaire entre ligne de base et évènements (~9,31 à 12,4 nm). Détection de particules allant de 40 à 100 nm lors des évènements (non détectée lors de la ligne de base). Courbe en cloche : limite mesure inférieure de l'EEPS => possibilité présence particule < 5,6 nm
m/z (Mesures PTRMS)	Mesures en continu en temps réel			↗	Pic élevé. C ₃ H ₆ O : 34,6 et 44,5 µg/m ³
m/z Acide valérique	Mesures en continu en temps réel	/	25 µg.m ⁻³	↗	
Acide valérique	prélèvement puis analyse en différé	nd	Env. 30-40 µg.m ⁻³	↗	Cabine = 60% cockpit
m/z C ₃ H ₆ O (acétone ou propanal)	Mesures en continu en temps réel		Evènement 1 : 34,6 µg.m ⁻³ Evènement 2 : 44,5 µg.m ⁻³	↗	
Marqueur huile (spectrométrie de mobilité ionique (aérotracer, GDA))	Mesures en continu en temps réel	nd		↗	Cohérence des différents dispositifs utilisés. Bruit de fond sans identification de marqueur d'huile pour la mesure de référence et détection d'une substance marqueur d'huile.
Acide acétique	Mesures en continu en temps réel	-	23 µg.m ⁻³	↗	
Autres acides	Mesures en continu en temps réel	nd	nd		
Formaldéhyde	Mesures en continu en temps réel	-	11,8 et 16,8 µg.m ⁻³	↗	
Benzène	prélèvement puis analyse en différé	2,1 à 3,6 µg.m ⁻³		→	
Organophosphate (PTRMS)	Mesures en continu en temps réel	< 0,5 µg.m ⁻³	< 0,5 µg.m ⁻³	→	les concentrations mesurées correspondent au bruit du système
Tributylphosphate (TBP)	prélèvement puis analyse en différé	Cabine : 5,65 à 7,35 µg.m ⁻³ Cockpit : 3,6 µg.m ⁻³	Cabine : → Cockpit : 12,4 µg.m ⁻³	Cabine : → Cockpit : ↗	L'augmentation de la concentration en TBP est due au fait que l'air n'était constitué que de bleed air et que le TBP est connu pour être une substance utilisée dans les fluides hydrauliques.

Substance / paramètre (méthode)	Types de mesures	Référence	Evènement provoqué	Variation	remarques
Acide acétique	prélèvement puis analyse en différé	Cabine : env. 64 µg.m ⁻³ cockpit : env. 32 µg.m ⁻³	Env. 120 µg.m ⁻³	↗	
Autres acides alcanoïques	prélèvement puis analyse en différé	< LD (2 µg.m ⁻³)	Env. 2 à 16 µg.m ⁻³	↗	y compris acide heptanoïque
Formaldéhyde, acétaldéhyde, acétone, propanal et butanal (prélèvement puis analyse en différé)	prélèvement puis analyse en différé	Cabine : Formaldehy de : 15 µg.m ⁻³ Acétaldéhyde : 8 µg.m ⁻³ Acétone : 11 µg.m ⁻³ Propanal : 1 µg.m ⁻³ Butanal : 5 µg.m ⁻³ Cockpit : Formaldehy de : 13 µg.m ⁻³ Acétaldéhyde : 7 µg.m ⁻³ Acétone : 5 µg.m ⁻³ Propanal : nd µg.m ⁻³ Butanal : nd µg.m ⁻³	Cabine Formaldéhyde : 31 µg.m ⁻³ Acétaldéhyde : 17 µg.m ⁻³ Acétone : 16 µg.m ⁻³ Propanal : 5-4 µg.m ⁻³ Butanal : 3 µg.m ⁻³ Cockpit Formaldéhyde : 28 µg.m ⁻³ Acétaldéhyde : 20 µg.m ⁻³ Acétone : 8 µg.m ⁻³ Propanal : 5 µg.m ⁻³ Butanal : 5 µg.m ⁻³	↗	Augmentation d'un facteur 2 à 3 par rapport à la ligne de base
acroléine	prélèvement puis analyse en différé	4 µg.m ⁻³	3 µg.m ⁻³	→	
Alcanes C9-C18	prélèvement puis analyse en différé	< LD = 1 µg.m ⁻³	1,1 - 3,9 µg.m ⁻³	↗	
Isomères mono-, di-, tri- ortho de phosphate de tricrésyle (TCP)	prélèvement puis analyse en différé	nd	nd		
tri(m,m,p)-, tri(m,p,p)- ou tri(p,p,p)-crésylphosphate (TCP)	prélèvement puis analyse en différé	nd	0,01 - 0,029 µg.m ⁻³	↗	
phosphate de tris(1-chloro-2-propyle) (TCPP-1)	prélèvement puis analyse en différé	Cabine : 0,195 – 0,487 µg.m ⁻³ Cockpit : 0,226 µg.m ⁻³	- Cockpit : 5,95 µg.m ⁻³	Cabine : → Cockpit : ↗	Le cockpit est un endroit où de nombreux équipements électroniques sont placés dans un espace relativement restreint. L'hypothèse des auteurs est que pendant l'essai au sol, la température des cartes électroniques augmenterait plus que dans des conditions normales, ce qui entraînerait une augmentation du TCPP.
phosphate de bis(1-chloro-2-propyle) (2-chloropropyle) (TCPP-2)	prélèvement puis analyse en différé	Cabine : 0,091 – 0,217 µg.m ⁻³ Cockpit : 0,072 µg.m ⁻³	Cockpit : 1,47 µg.m ⁻³	Cabine : → Cockpit : ↗	

Substance / paramètre (méthode)	Types de mesures	Référence	Evènement provoqué	Variation	remarques
↗ forte augmentation de la concentration → concentration stable ↗ augmentation modérée de la concentration nd : non déterminé LD : limite de détection EEPS : Système de mesure des particules à l'échappement du moteur (<i>Engine Exhaust Particle Measurement System</i>)					

D'après les auteurs, l'apparition de l'odeur serait principalement due à la libération d'acides organiques à partir de l'ester gras synthétique provenant de l'huile de moteur, et notamment à l'acide valérique. La concentration en acides carboxyliques saturés C5 à C8 a également augmenté au cours des évènements provoqués et peut également contribuer à la perception de l'odeur ; de même que les concentrations accrues d'aldéhydes, en particulier de formaldéhyde et d'acétaldéhyde.

D'après les auteurs, l'augmentation des acides C2, C5, C7 et des aldéhydes C1, C2, C3 semble être le meilleur indicateur d'une contamination par de l'huile artificielle. En effet, même s'il est observé une forte augmentation du nombre de PUF au début de l'évènement olfactif, les PUF sont susceptibles d'être mélangées à des PUF provenant d'autres sources, par exemple les gaz d'échappement du moteur ou la condensation.

Les mesures en temps réel, basée sur la spectrométrie de mobilité ionique (aérotracer, GDA) ont permis d'enregistrer les évolutions temporelles de traceurs d'huile moteur. Des pics ont été enregistrés au moment où les manœuvres pour provoquer l'évènement de contamination ont été effectuées.

Parmi les composés mesurés, la présence de TBP est probablement due aux conditions expérimentales elles-mêmes (modifications des systèmes hydrauliques sur l'avion test). Le benzène a été mesuré aussi bien pour les conditions de base que lors des évènements provoqués. Ce polluant est typique des émissions dues au déplacement des véhicules routiers sur les pistes dans l'aéroport.

Les méthodes en temps réel basées sur la spectrométrie de mobilité ionique ont permis, dans les conditions des essais, de détecter les évènements CAC provoqués, cependant ces méthodes ne permettent pas d'identifier les composés générés lors de ces évènements.

Les méthodes de mesure avec prélèvement et analyse en différé sont les mieux décrites. Les résultats chiffrés restent cependant expérimentaux (mesurés en situation expérimentale, reproduisant au mieux les conditions réelles de vol mais sans doute moins bien les évènements eux-mêmes - modification des systèmes hydrauliques notamment de l'avion test, présence des chercheurs menant les essais, et surtout actions des pilotes-test et membres d'équipage-test différentes, répondant aux enregistrements et aux objectifs du test). Seule une analyse relative des résultats – évolutions observées entre "vol de base" et évènements – n'a de sens.

Compte tenu des limites évoquées, si la nature des contaminants détectés n'est pas remise en question, ceux-ci ne peuvent être considérés que comme des traceurs d'une exposition.

5.4.5.3 Désinsectisation

Le transport aérien d'une région du monde à l'autre est le mode de transmission privilégié des insectes et des maladies dont ils sont les vecteurs. Le traitement préventif de la cabine des avions à l'aide d'insecticides, utilisés purs ou en mélange, en aérosol, en fumigation ou en pulvérisation, est donc une nécessité reconnue. Les traitements sont appliqués avant, pendant ou à la fin du vol. Le risque d'exposition des membres d'équipage et des passagers est une problématique régulièrement évoquée dans la littérature.

La revue des protocoles de désinsectisation réalisée par Maddalena et McKone en 2008 montre que la perméthrine et la phénothrine étaient au moment de l'étude les principes actifs les plus utilisés, mais ni le nom des produits commerciaux mis en œuvre, ni les quantités pulvérisées n'étaient connus. A la date de la publication, quatre protocoles d'application étaient recommandés par l'Organisation mondiale de la santé (OMS), à choisir selon/par le pays de destination (WHO 1985, WHO *et al.* 1995, WHO 1998) : le traitement rémanent par un produit émulsifiable concentré dit « *residual treatment* », la délivrance d'un aérosol d'une solution à 2% de phénothrine (7 mg de principe actif.m⁻³) par les techniques dites des « *blocks away* » après l'embarquement des passagers et juste avant le décollage, « *top of descent* » quand le produit est pulvérisé quand l'avion commence sa descente et « *on arrival* » quand la cabine est traitée juste avant que les passagers ne quittent l'avion. Un autre type de traitement est aujourd'hui proposé comme alternative, avec une pulvérisation d'aérosol avant que les passagers ne soient montés à bord (WHO 2021).

Un premier essai de modélisation mathématique des traitements par applications successives d'insecticides (Maddalena et McKone 2008), a confirmé que ceux-ci pouvaient s'accumuler sur les surfaces et que les quantités dispersées dans la cabine peuvent être mesurées par prélèvement dans l'air.

Parmi les cinq articles revus par Pang *et al.* (2020) (cité par Hayes *et al.* 2021) deux relatent une modélisation (Wei, Isukapalli et Weisel 2013 et Zhang *et al.* 2013) et trois présentent une étude expérimentale (Berger-Preiß *et al.* 2004, Berger-Preiß *et al.* 2006 et Sullivan, Keiding et Wright 1962) visant à étudier l'exposition des équipages en lien avec la désinsectisation de routine des avions.

En 2004, Berger-Preiß *et al.* décrivent des essais de simulation de désinsectisation : un produit biocide a été appliqué dans des avions au sol, ventilation en fonctionnement de manière à simuler une pulvérisation en vol. Des mesures de l'exposition des applicateurs (mesure au cours de l'application puis pendant 20 min après l'application), des concentrations en pyréthrine et butoxyde de pipéronyle dans l'air au niveau des sièges passagers (mesure pendant l'application puis pendant 40 min post application), sur les surfaces et dans les poussières sédimentées ont été effectuées avant et après l'application. Les résultats publiés constituent un premier scénario d'exposition : Les concentrations en pyréthrine (produits actifs des formulations) dans l'air étaient comprises entre 11 et 65 µg.m⁻³, celles en butoxyde de pipéronyle (agissant en synergie dans les formulations) étaient de 200 ± 485 µg.m⁻³, les concentrations sur les surfaces des équipements très variables, pouvant atteindre 55,5 ng.cm⁻² pour les pyréthrine et 1162,5 ng.cm⁻² pour le butoxyde de pipéronyle (valeurs médianes) sous et sur les sièges et sur les appuie-têtes, alors que de plus faibles

concentrations ont été déterminées sur les surfaces en position verticale (valeurs médianes : pyréthrin 2 ng.cm⁻² ; butoxyde de pipéronyle 17 ng.cm⁻²).

En 2006, des concentrations comprises entre 853 and 1753 µg.m⁻³ de d-phenothrin ont été mesurées par Berger-Preiß *et al.* (2006) pendant et jusqu'à 5 minutes après l'application de deux types d'aérosols concentrés à 2% selon une nouvelle technique expérimentale de vaporisation avant l'embarquement. Des concentrations de 36 à 205 µg.m⁻³ ont été mesurées 5 à 20 min après la fin de la pulvérisation et après 20 min seulement 1 µg.m⁻³ étaient détectables. Des quantités de 100 à 1160 ng de d-phénothrine.cm⁻² ont par ailleurs été retrouvées sur les principales surfaces horizontales de la cabine. Les auteurs de ces essais ont conclu que le risque d'exposition par inhalation était négligeable pour les passagers embarquant après un tel traitement insecticide, et qu'une possible exposition par contact cutané avec les sièges et les repose-têtes pendant le vol, restait très faible (Berger-Preiß *et al.* 2006).

Par modélisation dans une cabine d'avion virtuelle, Zhang *et al.* (2013) conclut que l'exposition des personnes en cabine quand le traitement insecticide est effectué juste avant l'embarquement par les équipes au sol (*pre-flight spray*) est 2 à 3 fois plus élevée que celle due à un traitement des surfaces par des professionnels de la désinsectisation avant le vol (*residual spraying*) ou à un traitement effectué pendant le vol par les membres d'équipage (*top of descent spraying*). Isukapalli *et al.* (2013) a également démontré par modélisation que des expositions par inhalation, voie cutanée et voie orale peuvent avoir lieu chez les membres d'équipage et les passagers d'un Boeing 767.

Wei *et al.* ont modélisé l'exposition des membres d'équipage par voie cutanée, orale et inhalée et les contributions de chaque voies étaient respectivement de 83,5%, 16,1% et 0,4% (valeurs médianes) pour le traitement résiduel, et de 5,3%, 5,0% et 89,7% pour la technique du « *pre-flight spray* » (Wei, Isukapalli et Weisel 2013).

Le dernier article traitait de l'utilisation d'une formulation concentrée en dichloro-diphényl-trichloro-éthane (DDT), aujourd'hui interdite (Sullivan, Keiding et Wright 1962).

5.4.5.4 Réaction de l'ozone dans des environnements d'avion simulés.

La réaction de l'ozone avec la peau humaine, avec les produits de construction, de décoration et l'ameublement dans les environnements intérieurs, dans les systèmes de ventilation a fait l'objet de nombreuses études (Weschler 2011). L'ozone réagit généralement avec les composés organiques, générant des produits secondaires volatils, principalement des aldéhydes, et des particules submicroniques qui peuvent avoir des effets néfastes sur la santé humaine (Weschler 2004; Fiedler *et al.* 2005). Les réactions entre l'ozone et les terpènes peuvent notamment être une source importante d'aérosols organiques secondaires en air intérieur (Sarwar *et al.* 2003).

Quelques études se sont spécifiquement intéressées aux réactions de l'ozone et dans les environnements intérieurs des avions.

En 2005, Wisthaler *et al.* ont rapporté que les produits d'oxydation dérivés des huiles cutanées figuraient parmi les principales espèces en phase gazeuse détectées lorsque l'ozone était introduit dans un environnement aéronautique simulé contenant des T-shirts souillés d'huiles cutanées (présents en tant que substituts d'occupants humains). Lors d'expériences ultérieures avec des « passagers » humains, les produits d'oxydation dérivés des huiles de peau figuraient à nouveau parmi les principales espèces en phase gazeuse mesurées lorsque

l'ozone était présent dans la cabine de l'avion simulé à des concentrations réalistes (Weschler *et al.* 2007).

Mizukoshi *et al.* (2019) se sont intéressés aux effets de la pression réduite sur la réaction entre l'ozone et le limonène dans un environnement simulé de cabine d'avion (chambre de réaction sous vide, sans ventilation – concentration en limonène de 14 mg.m⁻³ et en ozone de 0,3 à 0,7 mg.m⁻³). Le limonène est fréquemment utilisé dans les désodorisants et les produits de nettoyage et est rejeté par les services de restauration dans la cabine de l'avion (Cf. partie 5.5.1.2). Les auteurs concluent que la réaction entre le limonène et l'ozone sous pression réduite est similaire à celle qui se produit sous pression atmosphérique.

5.5 Résultats de mesures en conditions réelles de composés gazeux et particulaires et de paramètres environnementaux

5.5.1 Contaminants mesurés et gammes de concentrations

Les contaminants mesurés dans l'air des cabines d'avions peuvent être des gaz (O₃, CO, CO₂, etc.), des composés organiques volatils, des composés semi-volatils (dont la volatilité est insuffisante pour qu'ils soient volatilisés en totalité et qui se retrouvent dans l'air sous plusieurs formes (gazeuse, particulaires - aérosol liquide - brouillard - ou solide – poussières) ou des solides (poussières/particules et particules ultrafines). Ces contaminants, en raison de leur forme physique, peuvent donc être inhalés, ingérés ou se trouver en contact avec la peau des occupants de la cabine.

La revue de la littérature a permis d'identifier deux revues de synthèse récentes permettant de dresser un état des lieux des connaissances sur la pollution dans l'air des cabines d'avions (R. Chen, Fang, *et al.* 2021, Hayes *et al.* 2021).

La revue réalisée par R. Chen, Fang, *et al.* (2021) a pour objectif d'une part de documenter le nombre d'études ayant effectué des mesures sur l'environnement de la cabine des avions et le nombre de vols et types d'avions concernés, le type de paramètres environnementaux mesurés, la nature des contaminants les plus couramment mesurés et les concentrations associées, et d'autre part de réaliser une comparaison des concentrations de chaque contaminant avec les normes et recommandations lorsqu'elles existent.

La revue de Hayes *et al.* (2021) a pour objectif de synthétiser les données existantes pour évaluer les expositions du personnel navigant aux fumées, odeurs ou émanations dans les cabines d'avions au regard des contaminants suivants : fumée de tabac, matières particulaires, retardateurs de flamme, organophosphorés (OP), COV, autres agents chimiques et radiations afin de déterminer le risque professionnel qui peut être attribué à cette exposition, ainsi que les lacunes dans les connaissances sur les sources, les voies d'exposition et les récepteurs qui peuvent exister.

Un descriptif plus détaillé de ces deux revues est disponible en Annexe 15.

Ces données ont été complétées par les données des études retenues lors de la phase d'éligibilité (Cf. partie 5.2)

Le Tableau 17 présente un panorama des données relatives aux contaminants chimiques et particulaires dans l'air des cabines.

Tableau 17 : Panorama des données relatives aux contaminants chimiques et particuliers mesurés dans l'air des cabines d'avion

Contaminant	Nombre d'études	Nombre de Vols	Années	Remarques	Références
O ₃	21	1092 (458; 634)	1967 – 2018 (1967 – 1992; 1992 – 2018)	/	R. Chen, Fang, <i>et al.</i> 2021
COV	27	1080	1997 - 2019	/	R. Chen, Fang, <i>et al.</i> 2021 Yin <i>et al.</i> 2021
CO ₂	20	655	1992 - 2019	/	R. Chen, Fang, <i>et al.</i> 2021
COSV	12	540	2000 - 2019	/	R. Chen, Fang, <i>et al.</i> 2021 Hayes <i>et al.</i> 2021
Particules / PUF	17	451	1992 - 2019	Mesures de concentration en nombre, en masse Mesure de carbone suie, retardateurs de flamme bromés, OP	Hayes <i>et al.</i> 2021 Michaelis, Loraine et Howard 2021 Yu <i>et al.</i> 2021
Carbone suie	3	52	2017-2019	/	Kim, Kim et Lee 2019 Targino, Machado et Krecel 2017 Anh Le 2019
CO	11	378	1992 - 2018	/	R. Chen, Fang, <i>et al.</i> 2021
NO _x	2	41	1999 - 2002	/	R. Chen, Fang, <i>et al.</i> 2021
NO ₂	3	37	1999 - 2002	/	R. Chen, Fang, <i>et al.</i> 2021
NO	1	5	1999		R. Chen, Fang, <i>et al.</i> 2021
SO ₂	1	5	1999		R. Chen, Fang, <i>et al.</i> 2021

5.5.1.1 Ozone (O₃)

À des altitudes ne dépassant pas quelques milliers de mètres au-dessus du sol, la contribution des émissions anthropiques à la pollution atmosphérique est faible, du moins en ce qui

concerne les polluants susceptibles d'affecter la qualité de l'air en cabine. Par conséquent, le principal polluant de l'air ambiant préoccupant à l'altitude de croisière est l'O₃.

L'O₃ en altitude provient de la photodissociation des molécules d'oxygène déclenchée par le rayonnement ultraviolet du soleil. L'O₃ lui-même est réactif et se décompose assez rapidement dans la stratosphère soit par photodissociation, soit par réaction avec des atomes d'oxygène, soit par destruction catalytique (par exemple, réactions avec des oxydes d'azote ou des oxydes de chlore). La persistance et la prévalence de l'O₃ stratosphérique est une conséquence de l'équilibre dynamique entre les taux de production et de destruction (NRC 2002).

À haute altitude, notamment aux latitudes élevées, les concentrations d'O₃ dans l'air extérieur peuvent être suffisamment élevées pour que l'introduction d'air dans la cabine entraîne des concentrations en O₃ qui dépassent les valeurs préconisées par l'EASA et la FAA (0,25 ppmv à tout moment au-dessus de 9 800 m ou une moyenne pondérée dans le temps de 0,1 ppm pendant un vol de 3 heures au-dessus de 8 200 m) (NRC 2002). C'est pourquoi ce polluant a fait l'objet de mesure en cabine depuis de nombreuses années.

R. Chen, Fang, *et al.* (2021) ont identifié 21 études publiées entre 1967 et 2021 rapportant des mesures d'O₃ et analysé les concentrations d'O₃ mesurées uniquement sur des vols non-fumeurs (11 études publiées entre 1999 et 2018). Les mesures ont été réalisées à l'aide d'analyseurs en temps réel par détection électrochimique (5 études) ou absorption UV (4 études), ou bien à l'aide de badges passif puis analyse en chromatographie ionique (2 études) et à l'aide d'un dénuder (1 étude). Les auteurs rapportent que la précision des analyseurs était de 1,5 ppb ou 2 %, bien que certains avaient une précision de $\pm 0,1$ ppm. Les pas de temps des dispositifs de mesure ne sont pas précisés, et la durée des mesures n'est pas rapportée dans la revue.

Les concentrations d'O₃ rapportées par R. Chen, Fang, *et al.* (2021) se situent entre 0 et 275 ppb avec des niveaux minimums situés entre 0 et ~ 20 ppb (médiane = 2 ppb). Les concentrations maximales rapportées se situent entre 10 et 275 ppb (médiane de 108 ppb). La concentration moyenne d'O₃ rapportée est de 38 ± 30 ppb (moyenne variant selon les études de 6 à 80 ppb) avec une médiane de 33 ppb.

Les auteurs précisent que 75% des concentrations maximales rapportées sont inférieures à 150 ppb. Les concentrations d'ozone ont été corrigées pour compenser les changements de pression atmosphérique dans trois des études, mais il n'est pas indiqué dans les huit autres études si cette correction avait été appliquée.

En 2013, l'ASHRAE a recommandé une surveillance permanente des concentrations d'O₃ dans les vols sur lesquels des niveaux excessifs étaient susceptibles de se produire et d'installer des convertisseurs d'ozone afin de limiter les concentrations dans l'air intérieur des cabines. D'après R. Chen, Fang, *et al.* (2021), compte tenu de cette recommandation et de la date des études prises en compte, il est probable que les niveaux élevés d'ozone mesurés sur des vols commerciaux aient été dus à des convertisseurs défectueux.

5.5.1.2 Composés organiques volatils

Les composés organiques volatils ont été mesurés dans l'air des cabines d'avions au cours de 28 références (R. Chen, Fang, *et al.* 2021, Yin *et al.* 2021), principalement à l'aide de prélèvement actif sur tube adsorbant (tenax ou gel de silice imprégné de 2,4-DNPH pour les composés carbonylés) suivis d'une analyse par chromatographie en phase gazeuse avec

détection par ionisation de flamme ou spectrométrie de masse (ou par chromatographie liquide avec détection UV pour les composés carbonylés). Des mesures de COV totaux (COVT) à l'aide d'une détection par photoionisation (PID) sont également rapportées (Tableau 18).

Tableau 18 : Caractéristiques des mesures de COV

Référence	N étude	Nombre de vols	Détails
R. Chen, Fang, et al. 2021	27 dont 12 rapportant des mesures réalisées au cours de vols non-fumeurs	1080 vols entre 1997 et 2019 Différenciation vols fumeurs et non-fumeurs / vols	Revue de synthèse COV individuels : actif/Tenax/désorption thermique/GC-FID/MS, Passif, Canister Durée de prélèvement non rapportée. COV totaux : PID. Transport et conservation des échantillons non rapportée.
Yin et al. 2021	1	28 vols intérieurs chinois (durée des vols de 1 à 4 h) et 28 vols internationaux (durée des vols de 4 à 14 h dont 82 % entre 10 et 14 h)	Période de mesure : mai 2018 à juin 2019 Mesures COV totaux : PID sur la durée du vol. Mesure COV individuel Les résultats sont exprimés en fonction des phases de vol, de la durée du vol et de l'âge de l'avion.

Parmi l'ensemble des mesures réalisées au cours de vols non-fumeurs, 140 COV ont été quantifiés après prélèvement actif (11 études, 533 vols), 48 COV après prélèvement passif (4 études, 32 vols) et 96 COV après prélèvement en canister (3 études, 97 vols). Les concentrations des polluants mesurés par prélèvement passif et canister sont toutes inférieures aux concentrations mesurées à l'aide des prélèvements actifs. Les concentrations maximales mesurées par canister correspondent au propionaldéhyde ($C_{max}=8,9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $C_{moy} = 4,6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 2 études, 30 vols) et par prélèvement passif au cyclohexane ($C = 6,5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). A titre de comparaison les concentrations maximales et moyennes mesurées par prélèvement actif pour ces mêmes composés sont respectivement de $94 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ et $2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ pour le propionaldéhyde (1 étude, 108 vols) et de $48 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ et $0,7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ pour le cyclohexane (1 étude, 69 vols).

Aussi le groupe de travail n'a-t-il exploité que les résultats des prélèvements actifs lors des vols non-fumeurs (11 études rapportées par R. Chen, Fang, et al. 2021 et l'étude de Yin et al. 2021). Dans ces douze études, 15 types de COVs ont été détectés, mesurés et relevés. Les composés les plus fréquemment retrouvés sont des composés carbonylés, des composés aromatiques, des alcanes, des composés halogénés et des alcools. Une synthèse des gammes de concentration et concentrations moyennes par famille de COV est présentée dans le Tableau 19.

Composés carbonylés :

- Parmi les composés carbonylés qui ont été mesurés dans au moins deux études, le formaldéhyde, l'acétaldéhyde, le nonanal, l'hexanal, le décanal, l'octanal, le butanal

sont les composés qui disposent des seuils olfactifs les plus faibles et pour lesquels la concentration mesurée est la plus élevée (moyenne de 1 à 14 $\mu\text{g.m}^{-3}$).

- La concentration la plus élevée mesurée pour l'acétone est de 384 $\mu\text{g.m}^{-3}$ (avec une moyenne de 14 $\mu\text{g.m}^{-3}$ (SD = 5,6), variant de 0,5 à 49 $\mu\text{g.m}^{-3}$).
- Les concentrations moyennes sont similaires à celles déterminées par Yin *et al.* (2021) : la concentration moyenne pour chaque composé carbonylé individuel était comprise entre 0,3 et 8,3 $\mu\text{g/m}^3$, excepté pour l'acroléine et l'acétone pour lesquelles la valeur moyenne était plus élevée (moyenne = 20,7 $\mu\text{g.m}^{-3}$). En complément des résultats publiés par Hayes *et al.* (2021) et R. Chen, Fang, *et al.* (2021), quelques composés carbonylés individuels supplémentaires ont été analysés par Yin *et al.* (2021) : la méthylhepténone (6-MHO) (3 $\mu\text{g.m}^{-3}$ [0-7] pour les vols courte durée, 2 $\mu\text{g.m}^{-3}$ [0-3] pour les longs courriers), l'acétophénone (1 $\mu\text{g.m}^{-3}$ variant de 0 à 2,5 $\mu\text{g.m}^{-3}$) et la cyclohexanone (1 $\mu\text{g.m}^{-3}$ variant de 0 à 2,5 $\mu\text{g.m}^{-3}$).

Composés aromatiques et alcanes :

- Parmi les composés aromatiques mesurés dans au moins deux études, le limonène, le toluène, le benzène et le m&p xylène ont les concentrations moyennes les plus élevées (respectivement 24 \pm 31 $\mu\text{g.m}^{-3}$, 15 \pm 12 $\mu\text{g.m}^{-3}$, 5,9 \pm 5,5 $\mu\text{g.m}^{-3}$ et 2,5 \pm 2,3 $\mu\text{g.m}^{-3}$)
- L'hexane, mesuré dans 3 études (137 vols), est l'alcane avec la concentration moyenne la plus élevée (20 \pm 31 $\mu\text{g.m}^{-3}$).
- Ces concentrations moyennes sont également similaires à celles rapportées par Yin *et al.* (2021) : les COV en C6-C16 sont les plus mesurés en cabine, avec 97% des concentrations s'échelonnant entre 0 et 10 $\mu\text{g.m}^{-3}$.

Composés halogénés :

- Quatre composés chlorés ont été mesurés dans au moins deux études retenues par R. Chen, Fang, *et al.* (2021): le trichloroéthylène (TCE), le tétrachloroéthylène (PCE), le 1,4-dichlorobenzène, et le chlorure de méthylène (concentrations moyennes variant de 0,4 \pm 0,2 $\mu\text{g.m}^{-3}$ pour le TCE à 7,3 \pm 5,7 $\mu\text{g.m}^{-3}$ pour le PCE), avec une concentration maximale de 304 $\mu\text{g.m}^{-3}$ pour le PCE.
- Le trichlorométhane a également été identifié et quantifié dans Yin *et al.* (2021) (moyenne = 5 $\mu\text{g.m}^{-3}$, gamme = 0 - 17,5 $\mu\text{g.m}^{-3}$).

Alcools :

- Quatre alcools ont été mesurés dans seulement deux études retenues par R. Chen, Fang, *et al.* (2021) : L'éthanol, l'isopropanol, le menthol et le 2-éthylhexanol. Excepté pour l'éthanol, les concentrations moyennes mesurées étaient inférieures 15 $\mu\text{g/m}^3$ (4,7 \pm 0,2 à 10 \pm 3,4 $\mu\text{g.m}^{-3}$). Les concentrations moyennes en éthanol mesurées sont de 386 \pm 899 $\mu\text{g.m}^{-3}$ (et varient de 7 à 5453 $\mu\text{g.m}^{-3}$). De nombreux autres alcools ont été détectés au cours d'une seule étude : eucalyptol, tert-Butanol, 3-Methylbutanol, alcool benzylique, 1-Butanol, 2-Phenoxyéthanol, 1-propanol, phénol, etc.

Tableau 19 : synthèse des concentrations en COV mesurées dans l'air des cabines

Famille de COV	Composés ayant les concentrations moyennes les plus élevées	Valeurs moyennes ($\mu\text{g.m}^{-3}$)	Concentration maximale ($\mu\text{g.m}^{-3}$)	Remarques
Carbonylés	formaldéhyde, acétaldéhyde, nonanal, hexanal, décanal, octanal, butanal, acétone	1 à 14	384	Valeur maximale correspond à l'acétone
Composés aromatiques dont terpènes	limonène, toluène, benzène et m&p xylène	0,5 à 24	1048	Valeur maximale correspond au limonène
Halogénés	trichloroéthylène (TCE), tétrachloroéthylène (PCE), 1,4-dichlorobenzène, chlorure de méthylène	0,4 à 7,3	304	Valeur maximale correspond au PCE
Alcools	isopropanol, menthol, 2-éthylhexanol, Ethanol	10 à 386 Si ethanol exclu : < 15	5453	Valeur maximale correspond à l'éthanol

Sources des COV

Les sources de contamination supposées sont discutées par les auteurs des revues R. Chen, Fang, *et al.* (2021), Hayes *et al.* (2021) qui rapportent eux-même les discussions des auteurs des articles retenus dans leur revue.

Pour Hayes *et al.* (2021) les sources en relation avec la présence des COV dans l'air des cabines, sont diverses : la contamination de l'air de conditionnement (*conditioning packs*) ou de pressurisation (la plus souvent évoquée), des fuites d'huiles moteur (prioritairement évoquées aussi par les auteurs des différents articles retenus par R. Chen, Fang, *et al.* (2021), la pyrolyse des composés issus de ces fuites, le mauvais fonctionnement de la ventilation et du taux de renouvellement d'air, la pollution du système d'eau potable (à partir d'une fuite dans le système d'air de conditionnement).

Pour R. Chen, Fang, *et al.* (2021) toujours, les fortes concentrations d'aldéhydes (nonanal, capronaldéhyde, décanal et octanal) et d'acide acétique fréquemment relevées en cabine, sont probablement produites par les réactions chimiques connues entre l'ozone et les lipides/squalènes de la peau (sébum), présents également sur les vêtements et toutes les surfaces touchées par les personnes présentes en cabine (sièges, accoudoirs, appuie-têtes). Le formaldéhyde et l'acétaldéhyde, possiblement associés aux huiles moteurs, fluides hydrauliques ou carburants, peuvent être aussi des produits de réaction avec l'ozone présent en cabine. L'acétone serait liée à la présence humaine (Yin *et al.* 2021).

Les sources évoquées du limonène en cabine sont quant à elles nombreuses : parfums, lessives, agents de nettoyage, déodorants, mais aussi, la consommation de fruits, les boissons aux agrumes et le thé à la bergamote. Le limonène a été fréquemment détecté sur les filtres d'air. Le limonène peut également réagir avec l'ozone et donner naissance à des aldéhydes et des aérosols secondaires (parmi lesquels le formaldéhyde).

D'après Yin *et al.* (2021), la variation des concentrations en COV au cours des différentes phases de vol pour les vols long-courrier est identique à celle des concentrations en CO₂, excepté pour la période des repas. Les faibles concentrations en COV mesurées en phase de croisière des vols long-courrier confirment l'importance de la ventilation en cabine pour diluer la contamination. L'augmentation lente mais constante des concentrations en COV pendant le vol de croisière de courte durée indique que les COV en cabine sont probablement générés à l'intérieur de la cabine (passagers, sièges, déchets et bagages) et une mauvaise dilution de ces émissions par le système de ventilation ne fonctionnant sans doute pas suffisamment longtemps. La grande variabilité des concentrations en COV observée lors de l'embarquement peut sans doute être reliée à la pollution de l'air dans les aéroports ou à celle de l'air de prélèvement. Les composés carbonylés et le d-limonène sont des composés typiquement générés au cours du service des boissons ou des repas, pendant lesquels leurs concentrations montrent une corrélation significative ($p < 0,05$) qui dure environ une heure. Et enfin, contrairement aux intérieurs ou aux véhicules neufs, les matériaux ne sont pas la source d'émission principale en cabine, car les concentrations en COV qui peuvent être mesurées dans les avions neufs, ne diminuent pas au cours des années.

De très nombreux COV appartenant à diverses familles chimiques ont été mesurés : composés carbonylés, aromatiques, alcanes, composés halogénés, alcools, etc.

Globalement, la nature des composés mesurés en cabine ne peut pas être remise en question. Si les méthodes de mesure sont bien discutées, les durées d'échantillonnage ne sont pas rapportées par R. Chen, Fang, *et al.* (2021). Dans les études princeps, cette durée d'échantillonnage pour la mesure des COV individuels n'est soit pas précisée (exemple : Dechow, Sohn et Steinhanses 1997, ACER 2012, Guan *et al.* 2014, Rosenberger, Beckmann et Wrbitzky 2016, Schuchardt, Koch et Rosenberger 2019), soit de durée variable, de 5 min (exemple Wang *et al.* 2014, Crump, Harrison et Walton 2011a) à plusieurs heures (exemple Lindgren et Norbäck 2002). Les COV totaux sont généralement mesurés en continu pendant la durée du vol.

Le détail des concentrations publiées (cas des méthodes moins « connues » : limonène, acroléine etc.) et la répartition des parts dues à chacun des composés détectés, doivent donc être regardés avec circonspection en donnant la préférence aux variations des moyennes des principaux composés chimiques les plus mesurés (en fréquence ou en quantité). Compte tenu des conditions de mesure différentes, les concentrations mesurées ne peuvent être considérées comme représentatives de l'air des cabines d'avions.

Aucune source d'émission précise des polluants identifiés n'a été caractérisée.

5.5.1.3 Particules

D'après la revue de Hayes *et al.* (2021), cinq publications scientifiques associées à 148 vols non-fumeurs (Crump, Harrison et Walton 2011a, Crump, Harrison et Walton 2011b; Guan *et al.* 2019; Li *et al.* 2014; Lindgren, Norbäck et Wieslander 2007; Zhai, Li et Zhao 2014) rapportent des mesures de particules dans l'air des cabines. Ces travaux ont lié l'augmentation du nombre de particules à plusieurs facteurs en considérant la taille des particules, l'âge des avions, les phases de vol (départ, décollage, croisière, atterrissage, arrivée), la météorologie, les émissions humaines et le suivi de l'avion en vol. La gamme moyenne des concentrations

particulaires varie de manière importante en fonction des vols. De fortes augmentations du nombre de particules ont été associées aux vols à travers les nuages ou lors du suivi d'un avion *via* notamment le système de *bleed air*. La phase de croisière semble être corrélée à de faibles concentrations particulières en nombre, tandis que la phase de roulage entraîne des concentrations en nombres plus élevés. Le phénomène de turbulence semble également augmenter le nombre de particules. Il a été démontré que des concentrations particulières non négligeables et durables existent lorsqu'une source constante de particules pénètre au sein de l'habitacle *via* le système de *bleed air*. Ainsi, les paragraphes suivants présentent les mesures particulières présentées au sein de la littérature scientifique en considérant les particules ultrafines (PUF), les mesures de concentration massique notamment en fraction alvéolaire, les mesures de granulométrie, et de composition chimique dont le carbone suie de cette phase particulaire en phase aérosol. Certains travaux identifiés *via* la revue de la littérature réalisée (Cf. renvoi partie 5.2) (Michaelis, Loraine et Howard 2021) ont été analysés en complément de la revue de Hayes *et al.* (2021).

Mesure de particules ultrafines (PUF) et de concentration en nombre

Trois études ont mesuré les concentrations totales en nombre de particules à l'aide d'un compteur de particules ultrafines (P-track modèle 8525, TSI) (Lindgren, Norbäck et Wieslander 2007, Crump, Harrison et Walton 2011a, Crump, Harrison et Walton 2011b, Michaelis, Loraine et Howard 2021). Ce dispositif permet de compter les particules sur une plage de diamètre allant de 20 nm à 1 µm. Cette gamme de tailles intègre des particules classées à la fois comme particules fines et ultrafines (PUF), les PUF étant caractérisées par des diamètres inférieurs à 100 nm.

Les auteurs des 3 études utilisent uniquement le terme de PUF dans leur publication pour rapporter les résultats. Crump *et al.* justifient cette approximation par le fait que les concentrations en nombre de particules sont généralement dominées par la fraction ultrafine. Crump *et al.* précisent également que les instruments disponibles et adaptés aux mesures de concentrations particulières pour des diamètres inférieurs 20 nm étaient trop grands pour être facilement portables et avaient des exigences d'alimentation électrique limitant leur utilisation en cabine d'avion. Dans la suite de cette partie, les résultats se rapportant à des particules qui n'entrent pas strictement dans le champ des PUF sont rapportés en tant que particules « ultrafines ».

Une autre étude a mis en œuvre un autre dispositif : le mini Wras de Grimm qui couvre la gamme avec 7 canaux de taille inférieure ou égale à 100 nm.

Le Tableau 20 présente les résultats des mesures de concentration en nombre de particules.

Tableau 20 : Synthèse des mesures de concentration en nombre de particules.

Auteur	Nombre de vols	Méthode de mesure	Concentration moyenne (nombre.cm ⁻³)	Concentration maximale (nombre.cm ⁻³)
Lindgren, Norbäck et Wieslander 2007 ^a	3	Compteur de particules P-Track 8525	475	3.10 ⁵

Auteur	Nombre de vols	Méthode de mesure	Concentration moyenne (nombre.cm ⁻³)	Concentration maximale (nombre.cm ⁻³)
Crump, Harrison et Walton 2011a, 2011b	100	(0,01 à 1 µm)	10 ³ à 10 ⁵	-
Michaelis, Loraine et Howard 2021	4			31 300 à 97 800
Guan <i>et al.</i> 2019	14	Grimm Mini-WRAS 1.371 (0,01 à 25 µm ^b)	417 ± 1089 ^c	-
<p>^a cité par Hayes <i>et al.</i> 2021 (supplementary data)</p> <p>^b dont sept canaux ≤ 100 nm, à savoir 10-14 nm, 14-19 nm, 19-27 nm, 27-37 nm, 37-52 nm, 52-72 nm et 72-100 nm avec une résolution temporelle d'une minute</p> <p>^c somme des 7 canaux de 10 à 100 nm.</p>				

Dans l'étude de Lindgren, Norbäck et Wieslander (2007), des concentrations en nombre de particules « ultrafines » ont été mesurées jusqu'à 3.10⁵ particules/cm³ dans le cadre d'un vol se situant derrière un autre avion en phase de croisière. Deux autres vols ont montré des niveaux importants de particules « ultrafines » pendant une demi-heure à 2 heures sans raison claire identifiée. Enfin, une augmentation régulière mais modérée des particules « ultrafines » (1.10⁴ à 2.10⁴ particules/cm³) a été observée lors de la préparation des repas dans les cabines d'avions.

Crump, Harrison et Walton, ont mesuré en 2011 des concentrations de particules « ultrafines » en nombre au cours de 100 vols pendant lesquels aucun événement de contamination de l'air de la cabine ne s'est produit. Les concentrations moyennes étaient comprises entre 10³ et 10⁵ particules/cm³ avec des valeurs maximales dépassant la portée de l'instrument, à savoir 5.10⁵ particules/cm³.

Les travaux de Guan *et al.* (2019), ont permis de caractériser des concentrations moyennes de PUF (10 - 100 nm) dans l'air de la cabine d'avion de 417 ± 1089 particules/cm³ (cumul des 7 canaux de taille de 10 à 100 nm). Certaines concentrations maximales ont été observées lors de turbulences ou lors de passage à travers les nuages. Un modèle simplifié a également été développé lors de cette étude afin d'estimer les sources de PUF. Ces auteurs ont indiqué que les PUF sont issues du système de prélèvement d'air non filtré dans la plupart des vols en phase de croisière.

Plus récemment, Michaelis, Loraine et Howard (2021) ont mesuré au cours de 4 vols (vols court-courrier (< 90 min), avions âgés de 7 mois à 14 ans, 2 transporteurs différents) des concentrations maximales en particules « ultrafines » allant de 31 300 à 97 800 particules/cm³ lorsque l'APU était utilisé comme source d'air avec le *bleed air* et les groupes d'air conditionné pendant la phase de montée. Dans deux des quatre vols étudiés, les pics étaient associés à une odeur d'huile de moteur. Des augmentations de concentrations de particules « ultrafines » ont été mesurées en lien avec les changements de puissance du moteur, de l'APU et des changements de configuration de l'alimentation en air. D'après les auteurs, ces résultats sont en corrélation temporelle avec les moments liés à une moins bonne efficacité des joints d'étanchéité des moteurs et des APU permettant d'éventuels fuites d'huile.

Aucune mesure de distribution granulométrique n'est disponible en lien avec les concentrations en nombre. Les auteurs associent les mesures de concentrations en nombre aux PUF mais sans information sur leur proportion. Il ne peut pas être clairement établi que ces concentrations se rapportent bien à des PUF.

Le groupe de travail souligne la nécessité de construire des stratégies de mesure de PUF dans les cabines d'avions commerciaux, comme évoqué par Guan *et al.* (2019).

Mesure de concentration massique

Six études sont attachées à mesurer la concentration massique en particules dans l'air des cabines. Les fractions granulométriques prises en compte étaient la fraction alvéolaire, les fractions PM_{2,5} et PM₁₀²¹. Plusieurs dispositifs de mesure ont été mis en œuvre : des capteurs de particules basé sur la diffusion de la lumière, un instrument optique couplé à un cyclone permettant la sélection de la fraction alvéolaire, ou bien un compteur de particules ultrafines.

Le Tableau 21 synthétise les résultats des mesures obtenues au cours de ces 6 études.

Tableau 21 : synthèse des concentrations massiques en particules

Auteur	Nombre de vols	Contaminant	Méthode	Moyenne (µg.m ⁻³)	Concentration maximale (µg.m ⁻³)
Lindgren et Norbäck 2002 ^a	26 (7 non-fumeurs)	fraction alvéolaire	Analyseur à lecture directe basé sur la diffusion de la lumière	3	7
Wieslander <i>et al.</i> 2000 ^a	4		Sibata P-5H2	4,3	12,7
S.C. Lee <i>et al.</i> 2000 ^a	16		TSI Q Trak	7,6	17
N. L. Nagda <i>et al.</i> 1992 ^a	92 (23 non-fumeurs)		Capteur optique couplé à un cyclone - gravimétrie	10,45 - 64,35	NA
Lindgren, Norbäck et Wieslander 2007	16	PM ₁₀	Dust-TrakTM Model 8520 (1 - 10 µm)	6	7
Yu <i>et al.</i> 2021	4	PM ₁ , PM _{2,5} , PM ₁₀	capteur de particules basé sur la diffusion laser	0,04 à 1,42 0,15 à 2,66 0,26 à 3,19	9,31 12,37 15,36

^a cité par Hayes *et al.* 2021 (supplementary data)

Dans le cadre des mesures de concentration massique dans les cabines d'avions, les travaux de Yu *et al.* (2021) ont impliqué des avions de ligne dont l'âge variait entre 0,7 et 13,2 ans.

²¹ La fraction alvéolaire correspond à la fraction des particules qui pénètre dans les voies respiratoires non ciliées. Elle est définie conventionnellement par une courbe d'efficacité de pénétration (une loi de distribution log-normale cumulée avec une médiane de 4,25 µm et un écart-type géométrique de 1,5). Les PM₁₀ et PM_{2,5} correspondent à la matière particulaire en suspension dans l'air, de taille suffisamment petite pour traverser une tête de prélèvement sélective de fraction granulométrique, avec une efficacité de coupure de 50 % pour un diamètre aérodynamique respectivement de 10 et 2,5 µm

Chaque vol a été divisé en quatre phases successives, de la fermeture de la porte de la cabine à sa réouverture, à savoir (1) - l'attente, (2) - le roulage au départ, (3) – le vol et (4) - le roulage à l'arrivée. La phase de vol a été identifiée comme la période entre le moment où l'avion quitte le sol et celui où il le touche à nouveau. La phase de roulage correspond au roulement de l'avion sur le sol de l'aéroport. Ces auteurs ont impliqué dans ces travaux des mesures de concentration massique particulaire grâce à un capteur de particules Matter Sensor (PMS3003, Plantower Inc.) placés sous un siège avec une résolution temporelle d'une seconde. Ces travaux ont mis en avant une décroissance des concentrations après la fermeture de la porte de la cabine de l'avion et confirment l'effet des fortes turbulences. Les concentrations particulaires les plus importantes ont été mesurées au sein de l'avion le plus ancien et âgé de 13,2 ans. Toujours d'après les auteurs, les phases de roulage et de croisière dans la stratosphère ont été associées à des concentrations massiques de particules plus élevées que lorsque l'avion était en croisière dans la troposphère (Guan *et al.* 2019).

Lindgren et Norbäck (2002) ont appliqué un instrument basé sur la diffusion de la lumière (Sibata P-5H2, Sibata Scientific Technology Ltd), lors de mesures effectuées à bord de 26 vols incluant 7 vols non-fumeurs. Une concentration moyenne de $3 \mu\text{g.m}^{-3}$ avec une valeur maximale de $7 \mu\text{g.m}^{-3}$ ont été reportées par ces auteurs. S.C. Lee *et al.* (2000) ont étudié les différences entre des vols fumeurs et non-fumeurs en comparant les concentrations massiques alvéolaires, c'est à dire les concentrations massiques calculées à partir des concentrations en nombre déterminées pour une fraction de taille de particule s'approchant de la fraction alvéolaire. La concentration massique alvéolaire (CMA) maximale des vols fumeurs a été caractérisé comme étant égale à $264 \mu\text{g.m}^{-3}$, soit 15 fois supérieure en comparaison avec les vols non-fumeurs ($17 \mu\text{g.m}^{-3}$). Ces auteurs ont indiqué que les concentrations mesurées étaient également liées aux activités des passagers au sein de la cabine d'avion. Concernant les CMA moyennes mesurées à bord des avions, des valeurs de $138 \mu\text{g.m}^{-3}$ et $7,6 \mu\text{g.m}^{-3}$ ont respectivement été rapportées par ces auteurs pour les vols fumeurs et non-fumeurs.

Wieslander *et al.* (2000) ont utilisé le même instrument pour les mesures de CMA. Ils ont également noté un effet du tabagisme (CMA moyenne de $66 \mu\text{g.m}^{-3}$ avec des valeurs maximales allant jusqu'à $253 \mu\text{g.m}^{-3}$). L'interdiction de fumer a ainsi réduit la CMA moyenne en dessous de $5 \mu\text{g.m}^{-3}$.

N. L. Nagda *et al.* (1992) ont de leur côté utilisé un instrument optique couplé à un cyclone permettant la sélection de la fraction alvéolaire lors de la phase de prélèvement de la phase particulaire pour ces mesures de CMA. Cette instrumentation a été étalonnée d'après les auteurs dans une chambre climatique et un environnement de bureau en lien avec des mesures simultanées impliquant une microbalance piézo-électrique et la méthode de gravimétrie de référence.

L'instrument Dust-TrakTM (modèle 8520, TSI) a également été utilisé pour des mesures de concentration massique particulaire dans une gamme de taille allant de $1 \mu\text{m}$ à $10 \mu\text{m}$ (PM 10) (Lindgren, Norbäck et Wieslander 2007). En lien avec ces mesures, les auteurs indiquent des CMA moyennes comprises entre 1 et $8 \mu\text{g.m}^{-3}$ à la fois pendant des vols présentant des conditions environnementales caractérisées par des humidités relatives importantes et faibles.

Les capteurs de particules basés sur la diffusion de la lumière mis en œuvre dans ces études mesurent dans un premier temps des concentrations en nombre puis calculent

des concentrations massiques via un facteur de conversion non établi en lien avec les cabines d'avion ce qui peut impacter la justesse de mesure.

A des fins de caractérisation de l'air des cabines d'avions, la question de la pertinence de ces mesures de concentration massiques (PM1, PM2,5, PM10, fraction alvéolaire) se pose, notamment en lien avec la contribution minoritaire des particules ultrafines.

Mesure de distributions granulométriques en nombre

Deux études rapportent des mesures de distributions granulométriques en nombre (Cf. Tableau 22).

Tableau 22 : mesures de distributions granulométriques en nombre

Auteur	Nombre de vols	Contaminant	Méthode	Moyenne (nombre.L ⁻¹)	Concentration maximale (nombre.L ⁻¹)	Remarque
Li <i>et al.</i> 2014 ^a Zhai, Li et Zhao 2014 ^a	9	Particules 0.3-0.5 µm	Compteur de particule Flucke	13257	102473	Les deux publications se rapportent à la même étude
		0.5-1 µm		1949	20668	
		1-2 µm		452	6288	
		2-5 µm		240	2874	
		5-10 µm		31	321	
		>10 µm		14	110	
Guan <i>et al.</i> 2019 ^a	14	(0,01 à 25 µm ^b)	Grimm Mini-WRAS 1.371	417000 ± 1089000	-	

^a cité par Hayes *et al.* 2021 (supplementary data)
^b dont sept canaux ≤ 100 nm, à savoir 10-14 nm, 14 –19 nm, 19–27 nm, 27–37 nm, 37–52 nm, 52–72 nm et 72–100 nm avec une résolution temporelle d'une minute

Dans le cadre des travaux de Guan *et al.* (2019), les concentrations les plus faibles étaient corrélées à la phase de croisière pour le canal de taille 72-100 nm. Certaines concentrations maximales ont été observées lors de turbulence ou lors de passage à travers les nuages. Un modèle simplifié a également été développé lors de cette étude afin d'estimer les sources de PUF. Ces auteurs ont indiqué que les PUF sont issues du système de prélèvement d'air non filtré dans la plupart des vols en phase de croisière.

Les travaux de Li *et al.* (2014) sont associés à des mesures de distributions granulométriques en nombre sur neuf vols courts pour une gamme de taille supérieure à 0,3 µm grâce à un compteur « Airborne particle counter » (FLUKE Corporation, USA). Cet instrument réalise les mesures selon six canaux de tailles particulières, à savoir 0,3-0,5 µm, 0,5-1,0 µm, 1,0-2,0 µm, 2,0-5,0 µm, 5,0-10,0 µm et 10,0 µm avec une efficacité de comptage de 100 % à partir de 0,45 µm. Selon le manuel d'utilisation, et d'après les auteurs, cet instrument n'est pas sensible à la pression atmosphérique en dessous d'une altitude de 1828 m (~80 kPa).

Les concentrations en nombre particulaire ont varié de 3,6.10² particules/L à 1,2.10⁵ particules/L. Pour chaque vol, ces concentrations ont diminué de la phase de roulage (avant le décollage) jusqu'à la phase de croisière caractérisée par les concentrations les plus faibles. Les auteurs mentionnent que plus l'altitude est élevée, plus les concentrations de particules

de taille supérieure à 0,3 µm associée à l'air de prélèvement provenant de l'atmosphère à l'extérieur de la cabine sont faibles. Ils rapportent que cela semble cohérent en lien avec la réduction de la distribution verticale dans l'atmosphère des concentrations de particules ayant des tailles supérieures à 0,3 µm, mais que les nuages représentent cependant une source de particules, qui peuvent être transportées au sein de la cabine d'avion *via* l'air de prélèvement. En effet, dans l'étude de Li *et al.* (2014), plusieurs vols ont été caractérisés par des pics de concentration particulaire dans l'air d'alimentation lorsque l'avion rencontrait des nuages en phase de montée ou de descente. Comme mentionné précédemment, des pics de concentration ont également été observés en phase de croisière lors de turbulences. Les auteurs précisent que cela peut être lié au potentiel relargage de particules déposées à la surface interne du conduit utilisé pour l'acheminement de l'air.

En termes de mesures de distributions granulométriques en nombre, les concentrations variaient de 210,5 à 102473,0 particules/L pour la gamme 0,3-0,5 µm. Pour les cinq autres canaux de taille, les concentrations particulaires étaient de 56,5 à 20668,1 particules/L (0,5-1,0 µm), de 20,5 à 6288,1 particules/L (1,0-2,0 µm), 27,5 à 2874,3 particules/L (2,0-5,0 µm), 2,1 à 321,3 particules/L (5,0-10,0 µm) et 0,7 à 110,4 particules/L (>10,0 µm). Cela indique notamment les fortes variations de ces concentrations au cours de la période de vol. Ces auteurs mentionnent également que, outre l'air d'alimentation comme source de particules en phase aérosol dans les cabines d'avions, d'autres facteurs sont susceptibles de contribuer à ces concentrations particulaires tels que les émissions humaines, la remise en suspension et le dépôt de particules sur les surfaces intérieures de la cabine.

Un instrument similaire (Fluke 983, FLUKE Corporation, USA) a été impliqué dans les travaux de Zhai, Li et Zhao (2014) pour 9 vols et selon les six canaux cités précédemment dans l'étude de Li *et al.* (2014). Cette étude a permis de déterminer que la remise en suspension ne représente pas un facteur important, que le dépôt particulaire influence légèrement les particules de tailles inférieures à 5,0 µm, que le taux de changement d'air et les émissions humaines ont un impact important sur les concentrations particulaires en nombre pour une gamme de taille inférieure à 2,0 µm, et que l'air d'alimentation affecte généralement les concentrations particulaires pour une gamme de taille supérieure.

En conclusion, quelques études rapportent la présence de PUF dans l'air de la cabine d'avions. Toutefois, du fait des méthodes utilisées, les particules mesurées ne correspondent pas toujours uniquement à des PUF, mais englobent des particules de tailles pouvant aller jusqu'à 25 µm. Les concentrations en nombre ou massique ne sont généralement pas rapportées en lien avec une distribution granulométrique permettant d'apprécier le caractère ultra-fin de l'aérosol mesuré. Des concentrations en nombre de particules plus importantes sont rencontrées lors de la traversée de nuages ou lors de turbulences. Concernant les mesures de particules, la méthodologie expérimentale et la stratégie instrumentale ne permettent pas de caractériser la phase particulaire en suspension dans l'air des cabines d'avions.

5.5.1.4 Composition chimique des aérosols

Concernant la caractérisation de la composition chimique de la matière particulaire, les travaux considérés au sein de la revue de Hayes *et al.* (2021) soulignent la rareté de telles analyses. Cependant, le prélèvement de la matière particulaire a démontré que les composés

organophosphorés (OP) et les retardateurs de flamme bromés sont présents en phase particulaire, soulignant la nécessité d'une telle caractérisation. Les travaux de Chaturvedi (2011) font référence à une étude britannique de 2004 dans laquelle des dépôts de type carbone suie ont été identifiés au sein des conduites d'alimentation en air de la cabine. Cette fraction carbonée contient de nombreux COV et dont des composés semi-volatils (COSV) tels que les isomères de TCP et le tris(méthyl-phényl) phosphate (TMPP). Un encrassement du catalyseur au palladium dédié à l'élimination de l'ozone a également été constaté par des éléments non présents à haute altitude tels que le soufre, le phosphore, le silicium, le chlore, le sodium et le calcium mais dont la présence a été corrélée à l'augmentation du temps de vol (Farrauto et Armor 2016, cité par Hayes *et al.* 2021). Il a été déterminé que le silicium provenait des joints toriques du moteur. La présence du sodium et du chlore peut être expliquée par le brouillard salin tandis que le phosphore et les traces de zinc proviennent des traces de vapeur d'huile utilisées pour lubrifier les équipements. Le soufre recueilli sur le catalyseur peut être dû à l'émission d'autres avions ou à des procédures de dégivrage (Farrauto et Armor, 2016). Le dégivrage avant le décollage peut également contribuer à une contamination élevée dans la cabine (Rosenberger 2018 cité par Hayes *et al.* 2021).

Concernant les mesures de concentration massique de carbone suie (BC pour *black carbon*) à bord des cabines d'avion, les trois études recensées ont mis en œuvre un aethalomètre portable (microAeth AE51, TSI).

Targino, Machado et Krecl (2017) ont mesuré en continu les concentrations de BC sur 41 vols commerciaux non-fumeurs (ainsi que dans 12 aéroports). Les plus fortes concentrations de BC ont été observées lors de l'embarquement et du débarquement (moyenne de $3,78 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), suivies de fortes concentrations dans le hall de l'aéroport (moyenne de $3,16 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) et à l'intérieur des avions stationnés avec les portes ouvertes (moyenne de $2,78 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). Les niveaux de BC étaient remarquablement bas lorsque les avions étaient au sol avec les portes fermées (moyenne $0,81 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), avec des concentrations incidentes relativement élevées (BC au 95^{ème} percentile = $2,82 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) suggérant que les panaches d'échappement de l'aire de trafic pénètrent dans la cabine par le système de ventilation. Les concentrations de BC les plus faibles ont été relevées pendant les vols (moyenne $0,20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 95^{ème} percentile = $0,52 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$).

Dans l'étude de Kim, Kim et Lee (2019) les mesures ont été réalisées au cours de neuf vols internationaux à courte et longue distance. Les concentrations de BC étaient globalement inférieures à $1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ pendant la phase de croisière avec des fluctuations importantes de concentration pendant la première heure en lien avec les vibrations du fuselage entre les phases de décollage et de croisière. Les travaux de Anh Le (2019) ont permis de caractériser des concentrations de BC similaires ($240 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ en moyenne) et augmentant rapidement lors de la montée des passagers en lien avec la mise en fonctionnement du moteur de l'avion.

Les concentrations mesurées en carbone suie au cours des vols sont plus faibles que les concentrations mesurées au sol. Des pics de concentration sont observés lors de l'embarquement des passagers ou au sol suggérant une pénétration de panaches d'échappement de l'aire de trafic dans la cabine par le système de ventilation. La question de la justesse de l'instrumentation portable mise en œuvre dans ces études se pose.

5.5.1.5 TCP et autres organophosphates

Les isomères du phosphate de tricésyle (TCP) ont été mesurés dans huit études, rapportées par Hayes *et al.* (2021) associées à 400 vols. Lorsque des TCP ont été identifiés et quantifiés au sein des cabines d'avions, les concentrations se situaient dans une gamme inférieure au $\mu\text{g}/\text{m}^3$. D'autres composés organophosphorés (OP) tels que le phosphate de tri-n-butyle (TnBP) et le phosphate de dibutylphényle (DBPP), généralement associés à l'utilisation d'huile moteur, sont plus courant et trouvés dans 100 % et 92 % des échantillons liés aux travaux de Solbu *et al.* 2011. L'isomère de tri-ortho crésyl phosphate (ToCP) a fait l'objet de plusieurs études, mais ce dernier a rarement été signalé dans l'environnement des cabines d'avions. Cela peut être associé au fait que ce composé a été en grande partie supprimé des formulations d'huile, et de la faible probabilité que les conditions « moteur » entraînent une trans-isomérisation (Megson *et al.* 2019). Le ToCP a été identifié dans une seule étude avec une concentration maximale de $22,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Crump, Harrison et Walton 2011a, 2011b). En lien avec la faible pression de vapeur des isomères et ainsi à une probabilité de présence réduite en phase gazeuse, les TCP (à l'exclusion du ToCP) ont été fréquemment trouvés lors du prélèvement par essuyage ou lors de prélèvement sur filtres à bord des cabines d'avions. Dans leur étude, de Ree *et al.* (2014) indiquent d'ailleurs que ces composés peuvent se fixer dans les conduits du système de contrôle environnemental des cabines d'avions et ainsi être libérés sporadiquement sous forme particulaire. Hayes *et al.* (2021) rapportent qu'une autre voie d'exposition à considérer est l'ingestion. En effet, Moir et Seabridge (2008) décrivent que les systèmes d'eau, y compris d'eau potable à bord des cabines d'avions, sont pressurisés par le système de prélèvement d'air et représentent potentiellement un réservoir de contaminants en lien avec la faible fréquence de nettoyage. La qualité de l'eau potable à bord des cabines d'avions est sous-étudiée et nécessite une investigation.

Au sein de la revue de R. Chen, Fang, *et al.* (2021), les travaux de N. L. Nagda et Rector (2003) ont mis en avant que les niveaux de composés organiques semi-volatils (COSV) autres que les TCP sont généralement en dessous des limites de détection dans des conditions de fonctionnement normales. Ceci est valable pour le triméthylolpropane phosphate (TMPP), le phosphate de triorthocrésyle (ToCP) provenant très probablement de la contamination par l'huile moteur au sein de l'air de la cabine d'avion, et le phosphate de tributyle (TBP). R. Chen, Fang, *et al.* (2021) indiquent au sein de leur revue que les systèmes hydrauliques utilisant l'air de prélèvement pour pressuriser le réservoir impliquent des clapets anti-retour doubles empêchant le reflux. Dans les rares cas de défaillance de ce clapet, du liquide hydraulique pourrait pénétrer dans le système de *bleed air*. Cela ne peut pas se produire dans les modèles B787 étant donné qu'il n'utilise pas ce système de prélèvement d'air. Au cours de la phase de roulage, les cabines d'avions prélèvent les gaz d'échappement d'autres avions environnant au sein desquels des TCP ont été identifiés (Schuchardt, Koch et Rosenberger 2019).

Des événements d'odeur ont été documentés dans neuf études rapportées par R. Chen, Fang, *et al.* (2021) (N.L. Nagda *et al.* 2001, Spicer *et al.* 2004, Muir, Walton et Mckeown 2008, Solbu *et al.* 2011, Crump, Harrison et Walton 2011a, Crump, Harrison et Walton 2011b, ACER 2012, de Ree *et al.* 2014, EASA 2017b). Ces derniers pourraient être associés aux COSV, notamment en lien avec des concentrations et fréquence de détection élevées, tels le phosphate de tributyle (TiBP) (concentration moyenne de $495 \pm 59 \text{ ng}/\text{m}^3$), et le tris(chloro-isopropyl) phosphate (TCPP) (concentration moyenne de $506 \pm 0,4 \text{ ng}/\text{m}^3$).

Il convient de mentionner que le phosphate de tributyle (TiBP) a également été détecté sur des filtres à air de cabines d'avion ayant été utilisés pendant 660 et 3937 heures de vol¹⁰¹. Le TMPP n'a pas été détecté, tandis que les concentrations de ToCP variaient de 0 à 22,8 µg/m³ avec une moyenne de 50 ± 14 ng/m³. Dans les travaux de Schuhardt *et al.*⁸⁹, le ToCP n'a pas été détecté (concentration inférieure à la limite de détection).

Selon la date de publication des articles, seule la phase volatile a parfois été prélevée, ou seules les particules ont pu être collectées ce qui conduit à une sous-estimation des résultats. Quand le caractère semi-volatil des espèces chimiques mesurées a bien été pris en compte, les performances de la méthode globale (prélèvement et analyse) ne sont que très rarement, voire jamais, estimées. Les protocoles d'assurance qualité, même s'ils sont bien menés et décrits, concernent, la plupart du temps, la partie strictement analytique (traitement de l'échantillon en laboratoire et technique d'analyse instrumentale). Si les informations sur la nature des TCP et autres organophosphates détectés en cabine ne peuvent généralement pas être mises en doute, une grande prudence s'impose pour juger de la fiabilité des résultats quantitatifs fournis, surtout s'ils sont comparés à d'autres milieux ou situations.

5.5.1.6 Retardateurs de flamme bromés

L'utilisation de retardateurs de flamme bromés dans les avions résulte d'exigences élevées en matière de sécurité incendie. A noter que les organophosphates, dont le tricrésylphosphate, peuvent être utilisés également comme retardateur de flamme (Anses 2015, PubChem *et al.* 2004). Ces composés sont des composés semi-volatils.

Hayes *et al.* (2021) rapportent que les travaux d'Allen *et al.* (Allen, Sumner, *et al.* 2013; Allen, Stapleton, *et al.* 2013) et de C. He *et al.* 2018 ont permis d'explorer la présence de composés ignifuges au travers de prélèvements réalisés lors de 83 vols. Le prélèvement de la phase particulaire en suspension dans l'air a mis en avant un taux de détection plus élevés pour la plupart des congénères du polybromodiphényléthers (PBDE). Le PBDE 209, le phosphate de tributyle (TnBP) et le TMPP ont notamment été mis en avant (C. He *et al.* 2018). R. Chen, Fang, *et al.* (2021) ont mis en avant que la phase particulaire en suspension dans l'air présente des charges importantes et que les voies d'exposition associées doivent être étudiées afin de déterminer le risque potentiel.

Les méthodes décrites par Allen, Sumner, *et al.* (2013) reposent sur un prélèvement à l'aide de tubes qui associent deux sections de mousse en polyuréthane et une plage de résine adsorbante XAD2. Ces tubes ne sont plus aujourd'hui recommandés pour le prélèvement des composés semi-volatils, car la phase particulaire n'est sans doute pas piégée correctement sur la mousse et ne respecte pas les critères validés pour le prélèvement des particules.

Compte tenu de leur faible volatilité, la présence de retardateur de flamme et d'organophosphorés a également été recherchée dans les poussières sédimentées.

Allen, Stapleton, *et al.* (2013) ont étudié l'exposition aux retardateurs de flamme au sein des cabines d'avion et plus spécifiquement dans la poussière collectée sur des surfaces de 19 avions commerciaux. Une large gamme de composés a été identifiée dans l'ensemble des échantillons, à savoir le BDE 47, 99, 153, 183 et 209, le tris(1,3-dichloro-isopropyl)phosphate (TDCPP), l'hexabromocyclododécane (HBCD) et le bis-(2-éthylhexyl)-tétrabromo-phthalate

(TBPH). Les travaux de Christiansson *et al.* (2008) et C. He *et al.* (2018) ont également permis d'identifier des retardateurs de flamme tels que les PBDE au sein d'échantillons de poussières de surface prélevés manuellement. He *et al.* ont également identifié des retardateurs de flamme organophosphorés lors du prélèvement de poussières par aspiration de surface. Strid *et al.* (2014) ont également identifiés de fortes concentrations de PBDE au sein de poussières prélevées dans la zone de chargement. Des concentrations élevées de HBCD ont également été détectées en lien avec la composition du matériau d'isolation de l'avion.

En conclusion, si les informations sur la nature des retardateurs de flamme détectés en cabine ne peuvent pas être mises en doute, la fiabilité des résultats quantitatifs fournis mérite réflexion compte tenu du caractère semi-volatile de ces composés. Les méthodes de mesures n'ayant pas pris en compte la phase aérosol et la phase vapeur, les concentrations sont sans doute sous-estimées.

5.5.1.7 Biocides / désinsectisation

Peu d'études rapportent des mesures d'insecticides dans l'air des cabines d'avion.

Pour les articles les plus anciens (Witter *et al.* 1961, Liljedhal, Retzer et Sullivan 1976), la mauvaise qualité du document scanné, les connaissances et les méthodes de prélèvement disponibles à cette époque, et la mise en œuvre d'expérimentations humaine et animale à dose très élevée, ne permettent de se fier ni aux unités transcrites, ni aux résultats quantitatifs fournis. Maddalena a proposé en 2008 une approche à l'aide de méthodes de prélèvement actif (pour obtenir des données immédiatement après un traitement) et passif (pour avoir une vision à plus long terme des expositions dans l'ensemble des avions traités). Le développement de l'échantillonneur passif proposé dans le projet, constitué d'une fine membrane polymère à placer dans le système de ventilation de l'avion, n'a pas abouti. Dans le rapport ACER 2012 sont rapportés des prélèvements surfaciques effectués par essuyage dans 15 vols domestiques aux USA (aucun pesticide détecté) et 45 vols internationaux (perméthrine détectée sur tous les types de surfaces dans les avions entrant ou sortant des pays nécessitant une désinsectisation rémanente (*Residual treatment*) ou après des actions de maintenance dans les avions ayant desservi ces pays. Les doses mesurées sont inférieures à $1 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$, soit moins d'un dixième valeurs-guides proposées aux USA pour l'application des pesticides dans les cabines d'avion ($50 \mu\text{g m}^{-3}$ sur les revêtements de sol (tapis) et $20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ pour les autres surfaces de la cabine), mais elles pourraient être transférées aux vêtements ou à la peau des passagers quand ils s'assoient ou qu'ils touchent les surfaces contaminées de l'avion. L'un des articles revus par Pang *et al.* (2020) précise que les formulations insecticides incluent des solvants (van Netten 2002).

5.5.2 CO₂ et renouvellement d'air

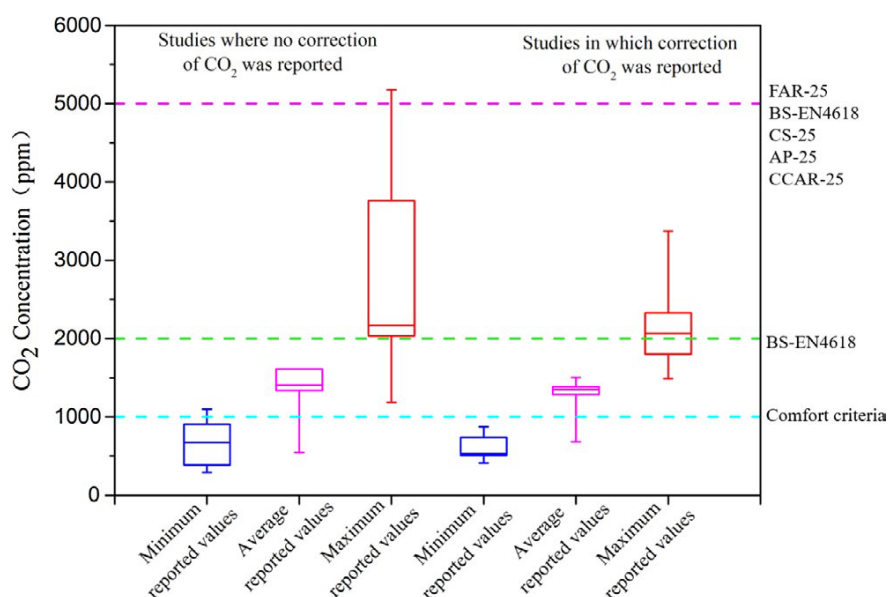


Figure 14 : Synthèse des données de concentration en CO₂ mesurées dans l'air de cabine d'avions issues de 19 études (source : R. Chen, Fang, *et al.* 2021).

Le dioxyde de carbone, produit par le métabolisme humain, peut constituer une image du taux de bioeffluents émis par les passagers et les membres d'équipage. Il est en effet toujours présent dans les espaces occupés tels que les bâtiments commerciaux, les transports en commun et les cabines d'avions. Sa concentration est liée à 3 paramètres : le nombre d'occupants, le taux de renouvellement d'air par personne et l'efficacité de la ventilation. Le dioxyde de carbone est considéré habituellement comme un paramètre environnemental essentiel, dont la mesure où il peut être utilisé pour vérifier si le taux de renouvellement d'air recommandé en cabine est respecté. C'est un indicateur de confinement d'air.

Il a été mesuré au cours de 19 études retenues par R. Chen, Fang, *et al.* (2021) et 11 études de Hayes *et al.* (2021). L'article de Yin *et al.* (2021) relève des tendances en fonction des phases de vol, de la durée du vol et de l'âge de l'avion mais ne fournit aucun détail sur les résultats eux-mêmes. Ceux-ci ont été publiés et exploités dans l'article des mêmes auteurs (J. He *et al.* 2021), qui étudie les concentrations en dioxyde de carbone en cabine sur une période de 30 ans, et rapporte en complément les résultats de mesures de CO₂ effectuées au cours de 52 vols commerciaux entre août 2017 et août 2019. Les concentrations mesurées lors de l'embarquement (1680 ± 558 ppmv) sont supérieures à celles des autres phases de vol (croisière : 1253 ± 164 ppmv, correspondant à un taux de renouvellement d'air estimé de $6,2 \pm 1,3$ L/s/p en classe économique), et distribuées de façon uniforme dans la cabine pour une même classe de sièges.

Globalement, les concentrations moyennes en CO₂ sont comprises entre 1000 ppm et 2000 ppm. Une concentration maximale, supérieure aux 5000 ppm établis pour la qualité de l'air dans les avions (Cf. partie 5.3), n'a que très rarement été mesurée.

Les concentrations reprises dans la revue de R. Chen, Fang, *et al.* (2021) sont des valeurs corrigées en fonction de la pression dans 7 études, les indications d'instruments non affectés par les changements de pression en cabine pour 3 études, et sans précision pour 9 articles. Celles rapportées par Hayes *et al.* (2021) s'échelonnent entre 520–2700 ppm (valeurs centrales) avec un maximum à 5177 ppm.

Les revues de R. Chen, Fang, *et al.* (2021) et de Hayes *et al.* (2021) ne renseignent pas sur les méthodes de mesure utilisées. Seuls J. He *et al.* (2021) précisent avoir utilisé des détecteurs portatifs à lecture directe équipés d'un analyseur infrarouge, permettant une mesure de CO₂ à ±50 ppmv ou à ±5% de la lecture, entre 0 et 2500 ppm avec une calibration juste avant les mesures, à l'aide de gaz étalons à différentes concentrations de CO₂ entre 500 et 2000 ppm. Les autres instruments existants sont les capteurs électrochimiques ou à semi-conducteurs. Les instruments sont, ou non, équipés d'une courbe de correction des résultats en fonction de la pression réelle en cabine.

Selon J. He *et al.* (2021) encore, les concentrations mesurées en classe affaire restent beaucoup plus basses que celles mesurées en classe économique alors que le taux de ventilation est le même dans les deux cas. Comparées à celles mesurées depuis une trentaine d'années, elles sont toutefois en décroissance légère mais constante, ce qui tend à prouver que le taux de renouvellement d'air augmente et que la qualité de l'air en cabine s'améliore.

Le taux de renouvellement d'air est en moyenne de $6,0 \pm 0,8$ L/s/p (Litre par seconde et par personne), dépassant la limite recommandée de 3,5 L/s/p, avec 96% des valeurs respectant même 5 L/s/p recommandée par le guide ASHRAE. R. Chen, Fang, *et al.* (2021) relèvent que les concentrations en CO₂ sont inversement et significativement corrélées au taux de ventilation ($r = -0,96$, $p < 0,05$ dans un Airbus 319, $r = -0,93$, $p < 0,05$ pour une autre étude dans différents avions B777, A330, B787, A320, B737, A320).

5.5.3 Mesures réalisées lors de fume events rapportés

Seules trois études présentant des résultats de mesures lors de vols au cours desquels des *fume events* ont été rapportés.

Van Netten a constaté en 1998 qu'il pouvait y avoir des fuites d'huile à deux niveaux du turbopropulseur que cette huile était dégradée thermiquement dans le convertisseur catalytique, en dioxyde de carbone et en eau, et qu'en cas de saturation de ce convertisseur, une certaine quantité d'huile et de monoxyde de carbone pouvait rentrer dans la cabine.

En 2011, Crump, Harrison et Walton précisent que des « *fume events* » ont été rapportés par le personnel navigant après 38 vols sur les 100 vols objets de son étude. Les concentrations en COV n'étaient pas plus élevées au cours de ces vols qu'au cours des vols sans évènement rapportés. A noter que les mesures ont été réalisées sur une période de 5 min.

Plus récemment, Michaelis, Loraine et Howard (2021) a effectué des mesures en temps réel de particules au cours de 4 vols et rapporte une augmentation des PUF en lien avec les changements de puissance du moteur, de l'APU et des changements de configuration de l'alimentation en air, et précise qu'au cours de 2 des 4 vols les pics enregistrés étaient associés à une odeur d'huile de moteur.

5.5.4 Polluants mesurés sur les filtres HEPA et dans les conduits de ventilation

La revue de la littérature réalisée a permis d'identifier cinq études rapportant des mesures de polluants sur les filtres utilisés pour l'air de recirculation de la cabine. Le projet FACTS de

l'EASA comprenait également une analyse des composés retrouvés après essuyage de différentes surfaces à l'aide de lingette.

Les travaux de Omana *et al.* (2016) avaient pour objectif d'étudier la stabilité de dépôts d'huile au sein de filtres HEPA en mesurant leurs persistance et composition au cours du temps par analyse gravimétrique et GC/MS, et en appliquant un flux d'air à travers les médias filtrants afin de simuler une utilisation réelle. Les résultats gravimétriques ont indiqué que l'huile moteur reste au sein des filtres HEPA pendant toute sa durée d'utilisation. Les analyses GC/MS ont également confirmé la persistance de TCP tout au long de cette durée. D'après les auteurs de cette étude, les marqueurs d'huile trouvés au sein des filtres sont stables et représentent une contamination accumulée dans le temps sans avoir plus d'information à propos des événements associés. Rosenberger (2018) (revu par Hayes *et al.* 2021) ont de leur côté identifié une réduction d'environ 30 % des concentrations en COSV dans le cadre d'Airbus A321 équipés de filtres à charbon. Ces auteurs précisent ainsi que les filtres HEPA équipés de tels filtres à charbon permettent d'améliorer la qualité de l'air intérieur en limitant les événements d'odeur. Dans ses travaux de thèse, Solbu *et al.* (2011) (revu par Hayes *et al.* 2021) a développé de nouvelles méthodologies pour l'échantillonnage des OP dans l'air dans le contexte de l'industrie aéronautique, notamment l'échantillonnage à long terme par dépôt sur des surfaces et coupons de charbon actif. Cela a permis de détecter la présence de TiBP, TnBP, TPP et TCP au sein des cabines d'avion, en plus de la détection de TCP dans les filtres HEPA. Tamás *et al.* (2006) (revu par Hayes *et al.* 2021) ont étudié les paramètres impliqués dans l'abattement des concentrations d'ozone dans un environnement simulé de cabine d'avion. Leurs travaux ont permis de montrer que les filtres HEPA chargés y contribuent à hauteur de 7 %. Les auteurs indiquent en effet que l'ozone peut aussi bien réagir avec le média d'un filtre HEPA neuf qu'avec les dépôts particulaires organiques prélevés par le média dans le cadre de filtres usagés.

En 2004, la *Civil Aviation Authority* (CAA) a procédé à l'analyse de trois conduits prélevés au sein de systèmes de climatisation d'avions (BAe 146), à savoir un conduit neuf, un second lié à des antécédents d'odeurs sans lien avec des symptômes de l'équipage, et un troisième associé à des antécédents d'odeurs liés à des symptômes de l'équipage. Cette étude avait ainsi pour objectif d'identifier au sein de ces conduits des composés non présents dans l'huile impliquée dans le fonctionnement d'un avion, et de savoir si ces composés pouvaient être relargués au sein du système de climatisation lorsque de l'air humide traversait le conduit. Des analyses par microscopie électronique ont montré que la surface intérieure du conduit neuf contenait du carbone, du chlore, du calcium, du cuivre et du magnésium et reflétait la composition des matériaux utilisés pour la construction du conduit. La surface intérieure des conduits usagés a mis en avant l'identification du dépôt d'une phase particulaire noire et la présence d'aluminium, de silicium, de soufre, de phosphore, de fer, de potassium, de titane, de chrome et de magnésium. Les auteurs précisent que la détection de ces éléments confirme l'hypothèse de l'huile de lubrification synthétique comme source de contamination des conduits. Les analyses par GC/MS des dépôts présents à l'intérieur des conduits usagés ont mis en avant la présence de TCP et de composés oxygénés associés à la pyrolyse d'huile synthétique. Les auteurs mentionnent que les composés relargués en phase gazeuse à 350°C à partir du dépôt particulaire recouvrant les conduits usagés correspondent à des produits de pyrolyse du lubrifiant impliqué dans le fonctionnement du moteur d'avion (CAA 2004).

Essuyage par lingettes (FACTS) (European Commission 2020a)

L'air de prélèvement potentiellement contaminé par les fluides pyrolysés ou tout autre composé chimique présent dans l'air ambiant, circule sur une longue distance entre l'extérieur de l'avion et la cabine. Des dépôts sont donc possibles sur tous les équipements et toutes les surfaces du système de ventilation (valves, capteurs, convertisseurs d'ozone, échangeurs de chaleur, extracteurs d'humidité, etc.). Les contaminants déposés peuvent également se désorber des surfaces sous l'effet de la vitesse d'air ou des conditions particulières de température et de pression.

Avant que les différents éléments de l'ECS ne soient démontés sur le site de maintenance et nettoyés, une collecte des résidus a été effectuée par essuyage de leurs surfaces internes (5x5 cm²) à l'aide de filtres en fibre de quartz de 2,4 cm de diamètre humidifiés par de l'acétone d'une pureté de 99 % (Protocole développé par l'*Institut für Arbeitsschutz* - IFA). L'objectif de ce type d'échantillonnage est de caractériser les contaminants volatils, semi-volatils ou particulaires qui pourraient circuler et se déposer dans l'ECS. Il n'est en effet pas possible de relier directement les résultats des essuyages effectués dans un avion à la qualité de l'air en cabine, compte tenu de l'historique non connu des vols et des interventions de maintenance.

Les composés suivants ont été recherchés : Organophosphates (32 composés), acides organiques (15 composés, gamme C2-C20 : C3, C4, C5 analyse quantitatives, C2, C6, C7-C20 : analyse semi-quantitative), hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP : 16 HAP EPA, analyse quantitative), polychlorobiphényles (PCB, 7 congénères, analyses quantitatives), rapport entre carbone élémentaire et carbone organique (CE/CO, analyses quantitatives).

Les auteurs de l'étude précisent que le nombre d'essuyage effectués reste limité et que ceux-ci doivent être interprétés avec toute la prudence nécessaire. Ils ne reflètent sans doute pas l'ensemble des dépôts (dont l'homogénéité n'est pas prouvée scientifiquement). Un calcul des concentrations des polluants chimiques dans l'air de la cabine ne peut absolument pas être envisagé à partir des quantités trouvées sur les lingettes d'essuyage, même si celles-ci étaient ramenées à une surface totale « supposée » de l'ensemble du système de ventilation.

Les concentrations en carbone organique (91% à 99% de la teneur totale en carbone) et en acides organiques étaient les plus élevées. L'acide acétique, l'acide hexanoïque, l'acide nonanoïque, l'acide n-hexadécanoïque et l'acide octadécanoïque sont les acides organiques les plus fréquemment trouvés (présents dans plus de 94 % des échantillons).

Moins de 1% des substances détectées sont des OP et moins de 0,02% des HAP (résultat qui confirme les prélèvements effectués dans le cockpit ou en cabine lors du Test 1) ou des PCB.

Aucun isomère ortho de phosphate de tricrésyle n'a été détecté (LD = 0,00001 µg.cm⁻²). Des isomères m- et p-TCP identifiés représentant entre 2 et 44 % de l'ensemble des organophosphates retrouvés sur les lingettes. Outre les isomères TCP(m/p), les organophosphates les plus fréquemment détectés étaient le TCPP-1, le DBPP, le BDPP, le TBP, le TPhP et le diphenyle EHP, qui étaient présents dans plus de 70 % des échantillons.

5.6 Conclusion

L'air présent dans la plupart des cabines d'avion est une combinaison d'air d'appoint provenant des moteurs appelé *bleed air* et d'air recyclé. Pour des raisons techniques, il n'existe pas d'unité de filtration pour éliminer les particules ou les composés organiques volatils (COV) du

bleed air avant qu'il ne pénètre dans la cabine. Toutefois la plupart des avions sont équipés de systèmes de filtres à haute efficacité (HEPA) utilisés pour filtrer les particules de l'air de recirculation (environ 40 à 60 % d'air recyclé). Dans certains modèles d'avions dits sans *bleed air*, l'air extérieur est prélevé directement à l'extérieur de l'avion *via* une entrée dédiée et un compresseur électrique.

Concernant la réglementation applicable en matière de concentration en polluants dans l'air des cabines, des lignes directrices sont établies par les instances internationales pour l'ozone, le monoxyde et le dioxyde de carbone. Le Code du travail définit quant à lui les règles générales de prévention des risques chimiques et notamment des valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) pour un certain nombre de polluants qui doivent être respectées.

Concernant les sources des polluants présents en cabine :

Celles-ci sont multiples. Elles peuvent être internes à la cabine en lien avec les matériaux de construction, matériaux constitutifs du mobilier, la préparation des repas, des défaillances électriques, la présence humaine, etc. Elles peuvent être également externes à la cabine comme par exemple une contamination du *bleed air* par l'air extérieur pollué (émissions diesel lié au trafic aéroportuaire, émissions des autres avions, pollution atmosphérique, procédures de dégivrage, etc.) ou par de l'huile moteur ou des lubrifiants en provenance des moteurs ou compresseurs ou bien encore par leurs produits de décomposition issus de leur pyrolyse.

L'hypothèse la plus couramment investiguée d'après la littérature est celle d'une contamination du *bleed air* par de l'huile moteur ou de fluide hydraulique (surremplissage, fuite, joint défectueux, etc.) ou des sous-produits issus de la combustion ou de la pyrolyse de cette huile moteur ou fluide hydraulique. C'est ce qui a dirigé les recherches d'organophosphates dans l'air en lien avec leur présence dans les huiles moteurs en tant qu'additif. Néanmoins, cette hypothèse 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. 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.

Les études expérimentales visant à analyser la composition des huiles/fluides hydrauliques et la composition des produits issus de leur chauffage/pyrolyse mettent en évidence la présence des quatre isomères de TCP ((tri(o,o,o), tri(m,m,p), tri(m,p,p) et tri(p,p,p)) dans toutes les huiles et vapeurs d'huile. Le phosphate de tri(o,o,o) crésyle n'a pas été détecté ni dans les huiles ni dans les vapeurs. Dans les vapeurs d'huile ont été retrouvées des HAP et des concentrations élevées de formaldéhyde et d'acétaldéhyde.

Les autres sources de contamination n'ont pas fait l'objet d'investigation, hormis de rares études anciennes simulant des opérations de désinsectisation. Certaines études suggèrent de s'intéresser également au processus de dégivrage.

De rares études se sont intéressées aux polluants présents dans les filtres HEPA, sur les conduites de ventilation et sur les surfaces intérieures des cabines telles que les sièges et mettent en évidence la présence de composés organiques semi-volatils.

La revue de la littérature effectuée n'a pas permis d'identifier d'études permettant de comprendre les processus d'émission des polluants retrouvés dans l'air des cabines ni les transformations physico-chimiques subies par les polluants potentiellement émis dans l'ensemble du système d'alimentation en air, depuis les parties basse et haute pression des moteurs en passant par le système de contrôle environnemental et les conduits, jusqu'au cockpit/cabine.

L'expression « *fume events* » est habituellement utilisée pour désigner des émanations ou odeurs inhabituelles identifiées attribuées à une contamination de l'air de la cabine par des huiles des moteurs. Considérant que l'origine de ces odeurs attribuées aux huiles moteurs n'est pas établie, il convient de ne pas restreindre la problématique d'une potentielle contamination de l'air de la cabine à cette notion de « *fume events* ». L'expression « événement de contamination de l'air en cabine (événement CAC) » est plus adaptée pour désigner tout événement modifiant la qualité de l'air de la cabine, peu importe la source à l'origine de cet événement ; ce type d'évènement étant détecté soit *via* l'apparition d'odeurs inhabituelles ou de fumées, soit par des mesures. Ces événements CAC sont généralement répertoriés en aéronautique sous la mention « feu fumée odeur » (FFO).

Concernant les polluants détectés / quantifiés dans l'air des cabines d'avions, et les méthodes de mesures :

L'analyse des études portant sur des vols non-fumeurs identifiées dans la littérature scientifique et la littérature grise a permis de mettre en lumière différents types de composés recherchés et mesurés dans l'air des cabines : des gaz (ozone (O₃), monoxyde de carbone (CO), etc.), des composés organiques volatils (COV), des composés organiques semi-volatils (COSV)²² (les organophosphates étant les plus recherchés) et ou plus récemment des particules notamment les particules ultrafines (PUF²³). En raison de leurs propriétés physico-chimiques, ces polluants peuvent être inhalés, se trouver en contact avec la peau des occupants de la cabine ou être ingérés.

L'objectif des mesures réalisées était soit d'identifier quelles molécules pourraient être responsables des événements CAC, soit de dresser un panorama des polluants présents dans l'air des cabines d'avions. Dans les études analysées, les mesures ont été effectuées en quelques points fixes de la cabine, parfois en cockpit, avec des stratégies de mesure différentes. Aucune mesure d'exposition des personnels navigant n'a été réalisée. La plupart des campagnes de mesures en vol diffèrent en termes de conception expérimentale, d'approche analytique et de présentation statistique des résultats.

Les études mettent en œuvre des méthodes de mesure généralement robustes pour identifier et quantifier les COV. Concernant les COSV, les méthodes de mesures ne prennent pas toujours en compte la phase aérosol et vapeur, ce qui conduit à une sous-estimation des résultats. Concernant les mesures de particules, la méthodologie expérimentale et la stratégie instrumentale ne permet pas de caractériser la phase particulaire en suspension dans l'air des cabines d'avions.

La nature des polluants identifiés et / ou quantifiés dans l'air des cabines ne peut être remise en question. Ainsi de très nombreux COV (aldéhydes, cétones, composés aromatiques, acides organiques, alcool, etc.), des particules dont du carbone suie, des organophosphates dont du

²² Composés semi-volatils qui peuvent se retrouver dans l'air sous plusieurs formes (gazeuse, particulaires - aérosol liquide - brouillard - ou solide – poussières)

²³ PUF : particules de diamètre < 100 nm

tricrésyl phosphate (TCP) ont été mesurés dans l'air des cabines. Cependant, la diversité des conditions de calibration/étalonnage, les conditions de conservation et de transport des échantillons, le délai entre analyse et prélèvement, la mise en œuvre ou non de blancs de terrain, d'échantillons répliqués ou d'échantillons de contrôle, la préparation des échantillons analytiques et les performances de la méthode (domaine d'application, rendements du prélèvement, sensibilité analytique) ne sont quasiment jamais précisés et pourraient expliquer les différences sur les résultats obtenus. Hormis pour les mesures de concentration en COV totaux et en particules réalisées en temps réel, les durées de prélèvement ne sont pas précisées dans les études ou ne sont pas adaptées.

Ainsi, si la nature des polluants mesurés n'est pas remise en question, la qualité des données de mesure est insuffisante pour que les gammes de concentrations et les moyennes rapportées soient considérées représentatives de l'ensemble des cabines d'avions.

Comparaison avec des valeurs limites ou valeurs guides existantes ou bien au regard de concentrations mesurées dans des environnements intérieurs type logements ou bureaux

Les revues de R. Chen, Fang, *et al.* (2021) et Hayes *et al.* (2021), de même que la plupart des auteurs rapportant des mesures de concentrations en polluants dans l'air des cabines d'avion discutent des résultats au regard de valeurs limites ou valeurs guides existantes ou bien au regard de concentrations mesurées dans des environnements intérieurs type logements ou bureaux.

Cependant, le groupe de travail a jugé, au regard des données disponibles, qu'il n'était pas pertinent de réaliser une comparaison avec une quelconque valeur limite ni mettre en regard les composés détectés dans les cabines d'avions avec les composés détectés dans d'autres environnements intérieurs ou d'autres moyens de transport, afin de ne pas sur-interpréter les résultats de cette comparaison.

Compte tenu des conditions environnementales particulières rencontrées dans les avions, la question de l'applicabilité de valeurs de référence aux conditions rencontrées dans les avions se pose et a fait l'objet d'une discussion dans le rapport FACTS de l'EASA (European Commission 2020a).

Les changements dans la situation d'exposition (c'est-à-dire les conditions physiques, telles que la pression de l'air ambiant, le taux d'humidité et le taux de ventilation) peuvent avoir un impact sur l'exposition (interne) et la physiologie, et donc sur le résultat toxicologique en termes de risque pour la santé. L'EASA s'est interrogée sur l'effet de certains facteurs sur la situation d'exposition : la durée d'exposition et les facteurs pouvant conduire à des différences en matière de dose interne.

Les valeurs limites professionnelles sont habituellement dérivées pour des durées d'exposition de 8h par jour, 5 jours par semaine, 48 semaines par an et 40 années. Les conditions d'exposition du personnel navigant peuvent être différentes, avec des durées d'exposition plus longues sur une journée, mais plus courtes sur une année. Les conditions d'exposition de courte durée pour le personnel navigant ne sont pas différentes en ce qui concerne la durée d'exposition.

La dose interne potentielle due à l'exposition à des substances chimiques dans l'air de la cabine par inhalation est déterminée par la combinaison de :

a) la concentration de la substance chimique dans l'air de la cabine (exprimée en masse/volume), b) la durée de l'exposition, c) la fréquence respiratoire, d) le facteur d'absorption et e) la masse corporelle et la composition de l'organisme.

Parmi ces cinq déterminants, seule la fréquence respiratoire et les facteurs d'absorption peuvent être influencés par l'environnement de la cabine.

- Fréquence respiratoire :

En raison de la baisse de la pression atmosphérique dans la cabine, la pression partielle de l'oxygène dans l'air est plus faible. Cela entraîne une diminution de la saturation en oxygène dans le sang. La saturation du sang en oxygène et en dioxyde de carbone régule, entre autres, la respiration. La réponse naturelle à une faible disponibilité d'oxygène (hypoxie) consiste à augmenter la profondeur et la fréquence de la respiration, ainsi que le rythme cardiaque. Dans les cabines d'avions, la diminution de la saturation en oxygène est cependant limitée car la cabine est pressurisée à 8000 ft. L'EASA rapporte que l'effet sur le volume d'air inhalé est limité ou que le volume d'air inhalé est moindre dans un environnement hypobare.

- Facteur d'absorption

L'EASA n'a identifié aucune étude expérimentale qui se concentre sur les différences d'absorption des produits chimiques inhalés à des altitudes plus élevées.

En conclusion, l'EASA rappelle que les propriétés toxiques intrinsèques d'un produit chimique ne sont pas dépendantes de l'environnement, et qu'il n'a pas été prouvé que les conditions hypobares rencontrées dans la cabine de l'avion influencent l'exposition interne aux produits chimiques lorsqu'ils sont exposés à la même concentration externe dans l'air au niveau du sol.

Sur cette base, l'EASA a conclu qu'il n'est pas nécessaire d'ajuster les valeurs de référence existantes pour qu'elles soient applicables à l'environnement de la cabine. Il pourrait être porté une attention particulière à l'influence d'une durée d'exposition plus longue sur 24 heures au cours d'une brève période qui peut se produire plusieurs fois par mois.

6 Etat des lieux des recommandations institutionnelles existantes sur les moyens d'action ou de prévention.

Ce chapitre est dédié à la description succincte de recommandations d'autorités compétentes dans l'aviation civile, nationale et internationale, sur la gestion de la qualité de l'air dans les cabines d'aéronefs et la prise en charge des personnels navigants se disant avoir été exposés à un évènement de contamination de l'air de la cabine.

6.1 Méthodologie

Afin d'identifier ces recommandations, deux axes ont été investigués :

- Une consultation internationale, *via* un document transmis par courriel (chapitre 2.5.)
- Une recherche dans la littérature grise (chapitre 2.2).

L'Anses a reçu six réponses provenant de Nouvelle-Zélande, Suède, République de Slovénie, Danemark, Norvège, Pays Bas mais qui n'ont pas apporté de données complémentaires, ainsi qu'une réponse de l'EASA dont les éléments sont repris ci-après.

6.2 Prévention : maintenance, formation/sensibilisation/information

Les spécifications actuelles de l'EASA pour les avions de grande taille exigent une quantité suffisante d'air frais pour que les personnels navigants puissent exercer leurs tâches sans fatigue ou inconfort induit, l'air frais étant supposé non contaminé de l'extérieur. Des valeurs limites sont établies pour l'ozone, le monoxyde et le dioxyde de carbone.

Concernant les moteurs, l'EASA spécifie qu'il ne doit pas se produire plus de 10^{-7} évènements dangereux par heure de vol du moteur. Parmi les effets dangereux des moteurs, il y a « les concentrations de produits toxiques dans l'air de prélèvement du moteur pour la cabine suffisantes pour induire une incapacité de l'équipage ou des passagers ». Par « produits toxiques », il est entendu « tous les produits qui agissent ou ont des effets d'un poison pour les humains lorsqu'ils y sont exposés ».

Les tests de la contamination de l'air prélevé, déterminant la possibilité de l'utilisation directe de l'air prélevé, doivent inclure des essais visant à déterminer la pureté de l'alimentation en air. Une analyse des défauts qui pourraient affecter la pureté de l'air de prélèvement doit également être effectuée. Si nécessaire, les défauts doivent être simulés et des essais, convenus par l'Agence, doivent être conduits pour établir le degré de contamination qui est susceptible de se produire. Si le défaut considéré est tel que le moteur doit être arrêté immédiatement, les essais requis peuvent être modifiés en conséquence.

Des spécifications analogues existent pour les APU, mais avec une fréquence d'anomalies supérieure à 10^{-5} évènements par heure de fonctionnement de l'APU.

L'autorité de l'aviation civile du Royaume-Unis (CAA) a publié une communication en 2002 (CAA 2002) indiquant une augmentation du nombre d'incidents fumées/émanations. Ils ont

conduit une analyse des incidents sur quatre types d'avions reconnus pour avoir un nombre d'incidents supérieur à la moyenne. L'analyse de ces incidents a permis d'émettre des recommandations d'inspection à la recherche de fuites d'huile, de maintenance sur les packs... Des échanges ont également eu lieu avec les opérateurs et les constructeurs pour réduire les risques de fumées / émanations.

En 2022, le comité européen de normalisation a publié un rapport technique « qualité de l'air en cabine d'avions civils - composés chimiques » (CEN 2022). Ce rapport, d'application non-obligatoire, indique que les compagnies aériennes, les services de maintenance et les constructeurs devraient appliquer le principe de précaution lors de l'évaluation des risques afin de caractériser les risques d'exposition aux principales sources de contaminations de l'air. Ce qui implique pour :

- les constructeurs : de mesurer les contaminants générés par le moteur et l'APU sur toute la gamme des réglages de puissance du moteur prévus en service, y compris les essais sur l'aile et les réglages de puissance transitoire, et doivent évaluer le potentiel de perte de fluide en fonctionnement normal, ainsi que les fuites accidentelles, les déversements et les débordements.
- les opérateurs : de procéder à une évaluation des risques de contamination de l'air de la cabine, y compris les risques qui ne peuvent être évités. Pour la plupart des substances cancérigènes et mutagènes, il n'est pas possible d'identifier des niveaux en dessous desquels l'exposition ne peut avoir d'effets néfastes.

Sur la base de ces évaluations de risques, les opérateurs, les services de maintenance et les fabricants se doivent d'appliquer le principe de précaution et la hiérarchie des contrôles pour réduire les risques d'exposition aux contaminants de l'air des cabines d'avions.

La hiérarchie des contrôles est définie comme suit :

- éviter les risques ;
- évaluer les risques qui ne peuvent être évités ;
- contrôler les risques à la source ;
- éliminer ou réduire les expositions chimiques dangereuses par la conception et l'organisation du système ;
- s'adapter au progrès technique ;
- substituer ce qui est dangereux par ce qui est non dangereux, moins dangereux ou sûr ;
- développer une politique globale et cohérente de prévention qui couvre la technologie, l'organisation du travail, les conditions de travail et l'influence des facteurs liés à l'environnement de travail ;
- donner des instructions appropriées aux travailleurs ;
- donner la priorité aux mesures de protection collective sur les mesures de protection individuelle.

Les constructeurs devraient notamment, avoir pour objectif une conception d'un système d'alimentation en air de la cabine qui prévienne la survenue d'effets néfastes chez les occupants de la cabine. Ils devraient également prévoir un système de surveillance et d'alertes dans la cabine en cas de dégradation de la qualité de l'air. Lorsque la conception du système d'alimentation en air ne permet pas l'élimination du risque, des mesures de réduction du risque

doivent être mise en œuvre, telles que l'utilisation de filtres, l'application de protocole de maintenance préventive, la formation des personnels navigants etc.

En terme de mesures de prévention, le rapport émet des recommandations techniques pour réduire le risque de sur-remplissage des réservoirs d'huiles et de fluides hydrauliques.

Formation des personnels navigants

L'OACI a publié, en 2015, une circulaire « Orientations sur les pratiques éducatives de formation et de compte-rendu concernant les émanations » (OACI 2015). Cette circulaire reprend des recommandations de sensibilisation et de formation des personnels navigants et des techniciens d'entretien des aéronefs (TEA), afin d'améliorer la prévention, la reconnaissance et la conduite à tenir en cas d'émanations, en particulier les émanations d'huile ou de fluide hydraulique des moteurs ou de l'APU provenant du système d'alimentation en air de l'avion.

Ainsi, concernant la sensibilisation de base, l'OACI recommande que l'exploitant se centre sur les points suivants :

- Sources et types d'émanation à bord,
- Descripteurs d'odeurs pour reconnaître la présence d'émanations d'huile et de fluide hydraulique,
- Potentiel d'affaiblissement des facultés,
- Procédures à appliquer en cas d'émanation,
- Compte-rendu d'émanations.

Les PNT devraient être formés à la mise en œuvre des modifications approuvées par les exploitants sur les modifications des séquences de démarrage des moteurs et APU visant à réduire le risque que des contaminants de l'air prélevé pénètrent dans le système d'approvisionnement en air.

L'objectif pour les techniciens est qu'ils soient formés aux méthodes utilisées pour résoudre les problèmes potentiels d'émanations provenant des systèmes d'approvisionnement en air

- Utiliser les comptes rendus des équipages
- Appliquer les méthodes de diagnostic

Enfin les deux derniers chapitres de la circulaire portent sur les méthodes de diagnostic et d'enquête sur les émanations.

Le comité européen de normalisation émet le même type de recommandations pour la formation des personnels navigants (CEN 2022).

La DGAC a publié une « Info Sécurité » en 2020, sur la prévention des émanations ou des odeurs de fumées dans les cabines d'avions ou le poste de pilotage d'avions. A noter ce type de document n'est pas assorti d'une obligation réglementaire. Son objet est d'attirer l'attention de certains acteurs du secteur aérien, sur un risque identifié (DGAC-DSAC 2020).

En termes de prévention des évènements, la DGAC a identifié les bonnes pratiques, ci-après :

- L'exploitation des « Services Bulletins » et des modifications proposées par les détenteurs de certificats type
- Le respect des procédures de maintenance et une sensibilisation au nettoyage des contaminants lors d'interventions sur les moteurs ou les APU
- La sensibilisation des agents assurant le dégivrage des avions
- L'adaptation, quand c'est possible, des procédures opérationnelles par les exploitants
- L'instrumentation de système de mesures de la qualité de l'air
- La définition de procédures dans les manuels d'exploitation des transporteurs aériens, et dans les manuels des spécifications des organismes de maintenance
- Le partage d'informations et l'amélioration du processus de traitement des notifications des évènements.

Elle recommande notamment de sensibiliser les personnels intervenant sur la maintenance, sur les risques d'évènement fumées et odeurs et sur la nécessité de mettre à jour régulièrement les procédures venant des détenteurs de certificats type.

La DGAC recommande que les personnels navigants soient sensibilisés sur l'application des procédures, et en particulier sur l'usage de moyen de protection individuel (masques à oxygène, cagoules...). Les incidents doivent être reportés dans le compte rendu matériel (CRM), en essayant d'identifier la source possible des émanations.

L'autorité de l'aviation civile américaine (FAA) a émis en 2018 un SAFO (*safety alert for operator*) au sujet des procédures en cas d'évènements de fumées, odeurs et émanations (FAA 2018). Les recommandations à l'attention des exploitants portaient sur :

- Une revue des recommandations internationales de l'OACI sur les incidents impliquant des produits dangereux, en cas de feux, explosion, fuites...
- Une évaluation de la politique et des procédures en vigueur concernant la reconnaissance, la différenciation et l'atténuation des odeurs, des fumées et/ou des émanations
- Une collaboration avec les fabricants, opérateurs et législateurs pour une amélioration continue des procédures d'atténuation (*mitigations procedures*) et pour identifier les risques potentiels.
- La création d'un guide pour les PN, incluant, les informations de sécurité, qui peut être diffusé par les canaux internes appropriés au fur et à mesure que des problèmes spécifiques sont identifiés.

6.3 Gestion en vol, procédures

Les données recueillies dans le cadre des auditions et de la revue de la littérature, décrite dans le chapitre 5.4.4, ne permettent pas de fournir une fréquence d'occurrence précise des évènements CAC sur l'ensemble des vols.

En cas d'évènement aigu lié aux fumées ou aux émanations en vol, l'EASA indique que l'équipage de l'avion suit des procédures standard pour gérer l'évènement. Ces procédures visent à minimiser l'exposition de l'équipage et des passagers et à maintenir le contrôle de

l'avion. Par exemple, l'équipage peut être amené à porter un masque avec une alimentation en oxygène à 100 % et à mettre fin au vol dès que possible.

Les préconisations de la circulaire de l'OACI sur la conduite à tenir en cas d'émanation différent en fonction du rôle des membres de l'équipage (OACI 2015).

Pour les PNT :

- Utiliser un masque à oxygène en cas de soupçon d'émanations
- Appliquer les procédures de l'exploitant
- Communiquer avec les PNC
- Appliquer les procédures après émanations : par exemple, exiger des membres de l'équipage qui s'est senti impacté par l'incident à consulter un médecin.
- Compléter les documents applicables : compte-rendu obligatoire selon les exigences de l'Etat de l'exploitant, livret technique d'aéronef, formulaire de compte-rendu de fumées et émanation (proposé par l'OACI dans sa circulaire) à compléter avec les PNC

PNC :

- Déterminer et repérer les emplacements / sources et l'intensité des émanations
- Communiquer entre les PNC et vers les PNT. Les éléments à communiquer, dans la mesure du possible, sont la nature et l'intensité des émanations, les signes visibles, la source apparente ou la confirmation que la source ne provient pas de la cabine, l'emplacement dans la cabine, la phase de vol, les mesures déjà prises et la coordination avec les PNT pour les mesures à prendre et la présence de PN ou de passagers impactés, y compris le type de symptômes et les premiers soins à prodiguer.
- Gérer les passagers
- Appliquer les procédures après émanation : surveiller la zone en question, maintenir la communication avec l'équipage, appliquer les procédures en cas d'incapacité de PN
- Compléter les documents applicables

Le comité européen de normalisation recommande la mise en place par les compagnies aériennes de protocoles en cas de fumées ou émanations qui ne seraient pas en lien avec un feu. Ces procédures doivent prévoir l'utilisation par les pilotes du masque à oxygène afin de garantir 100 % d'oxygène sous pression positive et la recherche de la source de contamination (CEN 2022).

La CAA recommande que les manuels d'exploitation incluent des procédures en cas d'incapacités des PNT, comme le port de masque à oxygène en première intention et que ces procédures soient régulièrement pratiquées lors de formations (CAA 2002).

6.4 Gestion Post événement

Dans sa circulaire 344-AN/202, l'OACI recommande également l'utilisation de comptes rendus normalisés proposés dans la circulaire, qui devraient inclure les éléments suivants :

- Détails sur le vol et la personne qui établit le compte rendu

- Renseignements sur la fumée ou le feu, s'ils sont pertinents (y compris la nature et la source apparente de la fumée ou du feu)
- Renseignements sur les émanations (y compris la source apparente des émanations)
- Autre observations (tous les incidents)
- Symptômes/ réactions (tous les incidents)
- Suivi et renseignements sur la maintenance (tous les incidents)

L'EASA, indique que suite à un évènement, un rapport de sécurité doit être réalisé conformément au règlement (UE) n°376/2014 concernant les comptes rendus, l'analyse et le suivi des événements dans l'aviation civile. L'enquête sur les événements signalés est menée conformément au règlement (UE) n° 996/2010 sur les enquêtes et la prévention des accidents et des incidents dans l'aviation civile.

Les actions d'inspection ou de maintenance de l'aéronef sont établies par l'exploitant de l'aéronef conformément aux procédures spécifiées par son constructeur ou celui du moteur.

Dans le rapport d'information SAE Aerospace AIR4766/2, les recommandations suivantes sont données pour la maintenance après un évènement :

- Isoler la cause et réparer.
- Nettoyer les fluides qui ont fui et qui pourraient être ingérés (par exemple l'entrée de l'APU).
- Nettoyer les pré-refroidisseurs et les échangeurs de chaleur ainsi que le système pneumatique.
- Nettoyer les conduits et composants pneumatiques avec des produits de nettoyage non toxiques ou remplacer les pièces si elles sont trop contaminées.
- Remplacer les filtres de recirculation s'ils sont fortement contaminés.
- Ouvrir les vannes appropriées pour évacuer l'air de l'APU ou des moteurs et les faire fonctionner pendant un certain temps. Cela permettra à l'air de prélèvement de rincer les pièces contaminées.
- Rétablir les vannes du système et faire fonctionner alternativement chaque groupe de conditionnement d'air jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'odeur. L'air de prélèvement évacuera les contaminants du système de climatisation. S'assurer qu'il y ait une sortie pour l'air conditionné, par exemple par une vanne d'évacuation ou des portes de cabine ouvertes.

Le comité européen de normalisation recommande la mise en place de procédures similaires à celle de l'OACI. La procédure doit avoir pour objectif d'aider les services de maintenance à identifier la source et à la réparer.

La CAA recommande que les PNT portent des masques à oxygène en cas de fumées ou d'émanation. Suite à un évènement :

- Le commandant de bord doit rédiger un compte-rendu en collaboration avec l'équipage
- Il faut déterminer si des membres d'équipage ont été affectés,
- Si des membres d'équipage ont été affectés, ils ne doivent plus « voler » jusqu'à ce qu'ils s'en sentent capable et après un examen d'aptitude médicale

L'EASA indique que les enquêtes sur les effets sanitaires potentiels à la suite d'un événement de contamination de l'air de la cabine sont menées par l'organisme d'enquête compétent sur les accidents. Un exemple d'une telle enquête a été présenté par l'organisme français d'enquête sur les accidents BEA lors de l'atelier de l'EASA en 2020 (EASA 2020).

Concernant la prise en charge médicale des personnels navigants se disant atteints du « syndrome aérotoxique », l'EASA indique qu'il n'y a pas à ce jour de protocole médical standardisé, en raison de l'absence de relation causale établie entre l'exposition à un événement de contamination de l'air de la cabine et des effets sur la santé.

Concernant le suivi des équipages et des passagers, le rapport technique du comité européen de normalisation indique que les opérateurs devraient surveiller l'état de santé des personnels navigants. Cette surveillance doit commencer lors de la visite d'embauche et se poursuivre après chaque incident lié à une exposition à une contamination de l'air de la cabine.

L'association internationale du transport aérien (IATA), une association commerciale des compagnies aériennes, a publié, en 2017, des lignes directrices pour le personnel de santé et de sécurité des compagnies aériennes sur la réponse médicale aux événements CAC (IATA 2017). Ces lignes directrices contiennent des recommandations similaires à celle de l'OACI sur les éléments à recueillir suite à un événement CAC pour évaluer les expositions (phase de vol, zone de l'avion affectée, source suspectée...) et les symptômes ressentis par les passagers et personnels navigants (nombre de personnes présentant des symptômes, type de symptômes...).

Les lignes directrices proposent également des éléments de diagnostic (voir chapitre 4.4.6).

Le ministère des transports des Pays-Bas a mis en place un comité consultatif sur l'air des cabines, en 2015, pour faire suite aux discussions internationales sur la qualité de l'air des cabines d'avion. Ce comité inclut des représentants des compagnies aériennes, des représentants des employés et des instituts de recherche, notamment l'Institut national pour la santé publique et l'environnement (RIVM, *Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu*), l'Organisation néerlandaise pour la recherche scientifique appliquée (TNO, *Nederlandse Organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek*) et le Centre aérospatial néerlandais (NLR, *Nederlands Lucht- en Ruimtevaartcentrum*). Le groupe consultatif conseille le ministre des transports sur le sujet et informe également les parties prenantes de l'état d'avancement des projets de recherche européens sur la qualité de l'air dans les cabines d'avion (RIVM 2022).

6.5 Retours des opérateurs

L'audition de la DSAC a permis d'appréhender les aspects réglementaires de la gestion des incidents en vol. Conformément à la réglementation, les constructeurs sont responsables de la collecte de tous les événements indésirables et doivent faire un rapport annuel d'analyse à l'autorité de certification (EASA, en Europe) et présenter les mesures correctives, le cas échéant. A ce jour aucune mesure corrective en lien avec des odeurs liées au système de

conditionnement de l'air n'a fait l'objet de mesures correctives, ce qui ne signifie pas que la problématique n'est pas traitée ni analysée. C'est dans cet objectif que la DGAC a publié une « Info Sécurité » en 2020 sur la prévention des émanations ou des odeurs de fumées dans les cabines d'avions ou le poste de pilotage d'avions (cf. chapitre 6.2). Si ce document n'est pas d'application obligatoire, les acteurs du secteur aéronautique doivent le prendre en considération et justifier des éléments qui ne seraient pas appliqués, lors des procédures d'audit.

Les auditions de 2 compagnies aériennes, Air France et Corsair, ont montré la difficulté qu'ils rencontrent pour traiter les problématiques d'odeurs. Cependant ils y travaillent avec les constructeurs. Plusieurs processus pour la gestion des « *fume events* », au niveau du personnel de maintenance et pour les personnels navigants ont été présentés et sont rapportés dans ce chapitre. A noter, les exemples de procédures sont mentionnés, sans qu'il soit spécifié quelle compagnie les met en œuvre, car *in fine*, les procédures mises en œuvre ne dépendent pas que de la compagnie aérienne, mais également des constructeurs.

Conformément à la réglementation, les événements « feu, fumée, odeurs » (FFO) doivent être rapportés par les personnels navigants, dans les « *logbook* » de bord, comme tout incident se produisant en vol. Les personnels navigants doivent être le plus précis possible dans la description de l'évènement : moment de l'évènement dans le vol, lieux, type d'odeur... afin d'aider les services de maintenance à identifier les causes et y remédier. En plus, des questionnaires spécifiques sur les conditions du FFO sont transmis aux personnels navigants.

En fonction des incidents déclarés, les équipes de mécaniciens prennent en charge l'avion soit en escale, soit dans la base principale. La réglementation veut que les équipes de maintenance répondent à toute remarque faite par l'équipage. Les procédures de maintenance sont déclenchées en accord avec les procédures des constructeurs.

Les systèmes de *reporting* permettent d'obtenir des statistiques sur le nombre d'évènements FFO, par avion, type d'avion. A noter, la source n'étant pas toujours identifiée, il n'y a pas de données précises sur le nombre de contaminations de l'air de la cabine qui pourraient être dû au système de conditionnement de l'air.

Au-delà du traitement de l'incident isolé au niveau d'un avion, les directions techniques analysent de manière globale les incidents en prenant en compte l'historique des incidents afin de proposer des recommandations.

6.5.1 Interventions sur les avions

Comme indiqué précédemment, les services de maintenance s'appuient sur les procédures des constructeurs (avionneurs, motoristes) pour identifier les causes et remédier aux FFO. Il n'est cependant pas toujours possible d'identifier la source des odeurs/émanations inhabituelles notifiée par les équipages. Les services de maintenance et les constructeurs échangent dans un objectif d'amélioration de la sécurité et du fonctionnement des appareils.

Concernant la maintenance, on peut distinguer la maintenance préventive et la maintenance curative.

Au niveau de la maintenance préventive, afin de détecter les fuites d'huile ou de les prévenir, les compagnies aériennes ont mis en place des actions de prévention (dépendant des modèles d'avions), par exemple :

- Vérification du niveau d'huile à une périodicité variable suivant les avions ou suite à une plainte d'équipage mentionnant des odeurs et/ou fumées,
- Réalisation des compléments d'huiles moteur dans les 20 minutes suivant l'extinction des moteurs, car à l'arrêt du moteur, l'huile a tendance à migrer dans le bas du moteur, ce qui fausse l'indication du niveau d'huile,
- Limite de 40 secondes pour les opérations de ventilations moteurs ou les séquences de démarrage moteurs, car ces événements entraînent une pression plus basse dans le moteur, qui peut entraîner une migration de l'huile dans le système de conditionnement d'air. Si la procédure est amenée à durer plus de 40 secondes, une procédure d'assèchement des moteurs est déclenchée.

Concernant la maintenance curative, le service de maintenance, suite à un événement, s'appuie sur les déclarations des personnels navigants pour analyser l'incident et mettre en œuvre les procédures écrites par les constructeurs pour traiter ces événements.

Pour déterminer l'origine de la pollution, des inspections sont effectuées par les techniciens de maintenance suivant la documentation du constructeur, par exemple :

- inspections visuelles pour détecter les fuites externes, qui pourraient être générées par l'APU,
- inspections internes au niveau du moteur avec des endoscopes ou des démontages, pour identifier d'éventuelles fuites au niveau des roulements,
- inspections des conduits entre les moteurs et les packs.

Il existe également des procédures de décontamination, afin d'éliminer les odeurs générées :

- Décontamination des groupes de conditionnement de l'air : il s'agit de faire fonctionner les groupes à marche « forcée » à hautes et basses températures afin d'assécher les résidus d'huiles ou autres contaminants
- Assèchement/purge des moteurs au sol : il s'agit de faire tourner les moteurs à haut régime pendant 20 minutes au minimum, afin que la température permette d'assécher les traces d'huile.
- Assèchement des conduits d'air localisés entre les moteurs et les packs : il s'agit de faire circuler de l'air chaud (> 200°C), qui provient des moteurs, entre les moteurs et les systèmes, afin d'assécher les traces d'huile

Ces procédures sont appliquées en fonction de l'événement et dans un ordre bien particulier, prescrit par les constructeurs car la source de l'odeur est inconnue. Il faut éviter de contaminer des parties du système qui pourraient être saines, ce qui aurait également pour conséquence de rendre plus difficile l'identification de la source.

- Assèchement des moteurs en vol : pendant le décollage, les moteurs sont utilisés à pleine puissance. Les prélèvements d'air sont coupés, les moteurs n'alimentent donc plus la cabine en air, ce qui permet aux moteurs d'atteindre des températures plus élevées, afin d'assécher les traces d'huiles présentes dans le moteur

A plus long terme, les échanges entre les constructeurs et les compagnies aériennes ont permis de mettre en œuvre des actions correctrices sur les avions pour limiter les « *fume events* », par exemple :

- Pour les fuites de dégivrage « générées » par l'APU, il est proposé la pose de gouttières visant à dévier les liquides de dégivrage s'écoulant à proximité de la porte d'accès de l'APU,
- Pour la contamination des packs, le logiciel de gestion pour modifier le cycle thermodynamique a été modifié, afin de limiter la diffusion d'huile en aval du circuit,
- Pour les fuites d'huiles moteurs, une modification dans le moteur visant à réduire la migration d'huile est prévue. Elle sera implémentée lors des opérations d'entretien des moteurs car celles-ci nécessitent le démontage des moteurs,
- La mise en place de filtre anti-COV est proposée au niveau de l'entrée d'air recyclé dans les packs.

6.5.2 Actions vis-à-vis des personnels navigants

Des actions de formation, sensibilisation ou information à la problématique des odeurs en cabine sont conduites auprès des personnels navigants, notamment lors des formations de maintien des compétences.

Suite à une exposition à un évènement de contamination de l'air de la cabine, les procédures mises en œuvres par les compagnies pour le suivi des personnels navigants diffèrent.

Des modalités de déclaration à la médecine du travail et des prises de sang pour mesurer les cholinestérases ont été mises en place par une compagnie.

Ce type de dosage n'est pas préconisé dans la seconde, en raison des limites de ce dosage aux faibles niveaux d'exposition, et de la variabilité intra et interindividuelle de l'ordre de 30% qui rendent difficile toute interprétation. Cette dernière recommande à son personnel navigant de se rendre dans un service d'urgence hospitalier en cas d'urgence vitale. En l'absence d'urgence vitale, les personnels navigants peuvent être accueillis au service médical pour un bilan clinique et/ou être orientés vers un centre antipoison. L'envoi systématique d'un questionnaire a été mis en place après un évènement FFO. Il permet de recueillir des informations sur les symptômes, les mesures prises pendant le vol, le suivi médical après le vol le cas échéant.

7 Conclusions du groupe de travail

Considérant l'état des connaissances sur les effets sur la santé associés à la profession de personnel navigant, il est conclu que :

- L'incidence plus élevée des cancers de la peau (épidermoïdes et mélanomes) et des leucémies chez les personnels navigants, par rapport à la population générale, pourrait être expliquée par leurs expositions aux rayonnements solaire et cosmique.
- Le faible nombre d'études et la non prise en compte des facteurs de confusion potentiels ne permettent pas de conclure sur l'augmentation du risque de cancers de la prostate et du sein chez les personnels navigants par rapport à la population générale. Le CIRC a, quant à lui, conclu qu'il existait des preuves limitées chez l'humain, mais suffisantes chez l'animal et au niveau mécanistique pour montrer le lien entre les cancers du sein et de la prostate et le travail de nuit posté.
- Concernant les maladies non cancéreuses, aucune augmentation du risque de maladies cardiovasculaires et respiratoires, de troubles psycho-sociaux et de troubles musculo-squelettiques ni d'effets sur la reproduction de la femme chez les personnels navigants n'a été mise en évidence à ce jour.
- Le terme « Syndrome aérotoxique » introduit en 1999 n'est pas une entité nosologique consensuelle. Les symptômes rapportés par les personnels navigants sont divers et aspécifiques, ce qui rend difficile la caractérisation d'un syndrome clinique.

A l'instar du *National Research of Council (NRC)* en 2002, le GT conclut à un niveau de preuve faible d'un syndrome spécifiquement lié à l'exposition à divers polluants ou produits de décomposition qui proviennent de fuites d'huiles moteurs ou de fluides hydrauliques.

- Les recherches récentes portent sur les effets sanitaires de certains composés de l'air de la cabine, en particulier les organophosphorés. Les données actuelles ne montrent pas d'effets sanitaires probants de ces composés aux faibles concentrations dans l'air.

Considérant l'état des connaissances sur les polluants gazeux et particulaires dans l'air des cabines d'avions, il est conclu que :

- De nombreux polluants gazeux et particulaires y sont présents. Cependant, compte tenu des conditions expérimentales différentes d'une étude à l'autre, les concentrations mesurées ne peuvent être considérées comme représentatives de l'ensemble des cabines d'avion et ne sont pas comparables entre elles.
- Ces données, qui n'ont pas été collectées dans un but de surveillance ni de contrôle d'exposition, ne permettent ni de caractériser l'exposition des personnels navigants, ni d'effectuer des comparaisons avec des valeurs limites ou valeurs guides existantes.
- L'expression « *fume events* » est habituellement utilisée pour désigner des émanations ou odeurs inhabituelles dont l'origine supposée est une contamination de l'air par de l'huile moteur. L'origine de ces odeurs n'étant pas établie, il convient de ne pas restreindre la problématique d'une potentielle contamination de l'air de la cabine aux

fume events. L'expression « évènement de contamination de l'air en cabine (évènement CAC) » est plus adaptée, quelle que soit la source de cet évènement.

- Les données disponibles sont insuffisantes pour valider les hypothèses émises pour expliquer la plupart des évènements CAC et notamment la plus courante d'une contamination du *bleed air*²⁴ par des composés issus de l'huile moteur ou de sa dégradation thermique.

Le GT conclut également que les données sont insuffisantes pour conduire une évaluation quantitative des risques sanitaires liés à la pollution de l'air dans les cabines d'avion.

²⁴ L'air de la cabine de la plupart des grands avions de transport est alimenté en vol par l'air prélevé dans les parties basse et haute pression des moteurs (*bleed air*) et, au sol, par l'air prélevé dans le groupe auxiliaire de puissance (APU).

8 Recommandations du groupe de travail

Considérant le *corpus* de connaissances trop limité pour orienter des actions de prévention, **des recommandations de veille scientifique et de recherche** sont uniquement émises :

- ❑ **Afin d'améliorer les connaissances sur la santé des personnels navigants, le GT recommande** de mettre en place des études épidémiologiques qui permettraient de documenter la morbidité et la mortalité des personnels navigants, et d'en étudier le lien avec les expositions professionnelles de cette population, tout en prenant en compte des potentiels facteurs de confusion individuels.

- ❑ **Afin d'améliorer les connaissances sur un syndrome clinique qui atteindrait spécifiquement les personnels navigants, le GT recommande:**
 - d'objectiver de manière systématique, par du personnel médical, les symptômes rapportés par les personnels navigants à l'issue d'évènements CAC,
 - d'étudier la pertinence de l'utilisation de biomarqueurs d'atteintes neuronales par les produits chimiques dans des essais cliniques, pour améliorer le diagnostic des personnes présentant des symptômes neurologiques,
 - de conduire des travaux sur l'identification des causes des symptômes rapportés par les personnels navigants en considérant tous les facteurs d'exposition,
 - de poursuivre les travaux sur les effets des organophosphorés, en lien avec les niveaux de concentrations mesurés en cabine, et sur le développement de biomarqueurs pour le suivi de ces effets ainsi que de l'exposition,
 - d'encourager les personnels navigants rapportant des symptômes suite une exposition à un évènement CAC, à consulter dans les Centres de consultation de pathologies professionnelles et environnementales (CCPPE) afin de documenter leur cas,
 - Pour mieux documenter les cas au sein du RNV3P :
 - d'introduire au sein du thesaurus des maladies, un code spécifique pour ce syndrome afin de permettre une meilleure identification des cas au sein de la base de données,
 - d'élaborer un questionnaire destiné aux médecins des CCPPE qui permette d'identifier des symptômes et les circonstances d'exposition à la suite d'évènements CAC.

- ❑ **Afin d'améliorer les connaissances sur la qualité de l'air dans les cabines d'avions, le GT recommande :**
 - de développer une stratégie de mesures (choix des vols, conception expérimentale, prélèvements, analyse et exploitation des résultats) afin d'harmoniser les approches de caractérisation de la qualité de l'air des cabines d'avion et de caractérisation de l'exposition individuelle des personnels navigants. Cette stratégie devra notamment permettre de caractériser des évènements CAC,
 - de mieux caractériser la phase particulaire, y compris les particules ultra-fines, en nombre, masse, granulométrie et composition,
 - de considérer la phase particulaire et la phase gazeuse des COSV afin de mieux caractériser leurs concentrations.

□ **Afin d'améliorer les connaissances sur les causes d'évènements de contamination de l'air des cabines, le GT recommande :**

- de mener des études permettant d'associer des mesures en temps réel à des mesures intégrées pour identifier spécifiquement les contaminants présents. Ces mesures doivent être associées à la tenue d'un journal de bord qui permettrait de tracer et d'horodater tout incident rapporté par le personnel navigant, en complément des *reporting* obligatoires,
- d'investiguer les différentes causes possibles des évènements de contamination de l'air de la cabine,
- d'étudier les processus qui influencent les émissions de polluants dans l'ensemble du système d'alimentation en air, des sections basse pression et haute pression, jusqu'au cockpit/cabine, en passant par le système de conditionnement d'air,
- d'identifier des traceurs appropriés pour surveiller la qualité de l'air des cabines en routine, en lien avec l'identification de sources,
- d'étudier la possibilité de contamination du système d'eau potable, quand celui-ci est pressurisé par le *bleed air*.

Le GT a identifié plusieurs projets de recherche en cours qui pourraient répondre en partie à ces recommandations :

- le projet SPACE sur la mortalité par cancers et maladies non cancéreuses, liées notamment à l'exposition au rayonnement cosmique,
- les projets AviSan et CAQIII sur la potentielle contamination du *bleed air* par des composés issus des huiles moteurs, fluides hydrauliques et de leurs produits de pyrolyse, ainsi que sur les effets de ces composés sur la santé, dont la neurotoxicité.
- les projets de la FAA et l'ASHRAE sur l'évaluation de capteurs destinés à détecter une contamination du *bleed air* par des huiles ou fluides hydrauliques.

9 Bibliographie

- Abou-Donia, M. B., M. M. Abou-Donia, E. M. ElMasry, J. A. Monro et M. F. Mulder. 2013. "Autoantibodies to nervous system-specific proteins are elevated in sera of flight crew members: biomarkers for nervous system injury." *J Toxicol Environ Health A* 76 (6): 363-80. <https://doi.org/10.1080/15287394.2013.765369>.
- Abou-Donia, M. B., A. Lieberman et L. Curtis. 2018. "Neural autoantibodies in patients with neurological symptoms and histories of chemical/mold exposures." *Toxicol Ind Health* 34 (1): 44-53. <https://doi.org/10.1177/0748233717733852>.
- Abou-Donia, M. B., FRW Van de Goot et MFA Mulder. 2014. "Autoantibody markers of neural degeneration are associated with post-mortem histopathological alterations of a neurologically-injured pilot." *J. Biol. Phys. Chem* 14: 34-53.
- ACER. 2010a. *Ozone in Passenger Cabins: Concentrations and Chemistry*.
- ACER. 2010b. *Report to the FAA on the Airliner Cabin Environment*.
- ACER. 2012. *In-Flight/Onboard Monitoring: ACER's Component for ASHRAE1262, Part 2*.
- Adi, Y., S. S. Bayliss, A. Rouse et R. Taylor. 2004. "The association between air travel and deep vein thrombosis: Systematic review & meta-analysis." *BMC Cardiovascular Disorders* 4. <https://doi.org/10.1186/1471-2261-4-7>.
- Adrian, H., K. Mårten, N. Salla et V. Lasse. 2016. "Biomarkers of Traumatic Brain Injury: Temporal Changes in Body Fluids." *eNeuro* 3 (6). <https://doi.org/10.1523/eneuro.0294-16.2016>.
- Allen, J. G., H. M. Stapleton, J. Vallarino, E. McNeely, M. D. McClean, S. J. Harrad, C. B. Rauert et J. D. Spengler. 2013. "Exposure to flame retardant chemicals on commercial airplanes." *Environmental Health: A Global Access Science Source* 12 (1). <https://doi.org/10.1186/1476-069X-12-17>.
- Allen, J. G., A. L. Sumner, M. G. Nishioka, J. Vallarino, D. J. Turner, H. K. Saltman et J. D. Spengler. 2013. "Air concentrations of PBDEs on in-flight airplanes and assessment of flight crew inhalation exposure." *J Expo Sci Environ Epidemiol* 23 (4): 337-42. <https://doi.org/10.1038/jes.2012.62>.
- Alvarez, L. E., S. D. Eastham et S. R. H. Barrett. 2016. "Radiation dose to the global flying population." *Journal of Radiological Protection* 36 (1): 93. <https://doi.org/10.1088/0952-4746/36/1/93>.
- Anh Le, H. 2019. "Real-time black carbon personal exposure levels in microenvironments: Home to home on a round-trip, Hanoi–Singapore." *Journal of the Air and Waste Management Association* 69 (3): 259-265. <https://doi.org/10.1080/10962247.2018.1537943>.
- Anses. 2015. *Évaluation des risques liés à l'exposition aux retardateurs de flamme dans les meubles rembourrés Partie 2 - Evaluation des effets sur la santé et sur l'environnement, et estimation qualitative du rapport bénéfices/risques - Avis de l'Anses et rapport d'expertise collective* (Maisons-Alfort : Anses), 264.
- Aragón-Vela, J., J. Bejder, J. R Huertas, J. Plaza-Diaz et N. B. Nordsborg. 2020. "Does intermittent exposure to high altitude increase the risk of cardiovascular disease in workers? A systematic narrative review." *BMJ Open* 10 (11). <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2020-041532>.
- Arjomandi, M., T. Haight, R. Redberg et W. M. Gold. 2009. "Pulmonary function abnormalities in never-smoking flight attendants exposed to secondhand tobacco smoke in the aircraft cabin." *Journal of Occupational and Environmental Medicine* 51 (6): 639-646. <https://doi.org/10.1097/JOM.0b013e3181a7f048>.
- Arneth, B. M. 2019. "Neuronal Antibodies and Associated Syndromes." *Autoimmune Diseases* 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/2135423>.
- ASHRAE. 2019. INVITATION TO SUBMIT A RESEARCH PROPOSAL ON AN ASHRAE RESEARCH PROJECT - 1830-TRP, Experimental Characterization of Aircraft Bleed Air Particulate Contamination.

- Bagshaw, M. 2013. "Aviation Medicine." Dans *Principles and Practice of Travel Medicine: Second Edition*, 287-314. : Wiley-Blackwell.
- Ballard, T., S. Lagorio, G. De Angelis et A. Verdecchia. 2000. "Cancer incidence and mortality among flight personnel: A meta-analysis." *Aviation Space and Environmental Medicine* 71 (3): 216-224.
- Balouet, J-C., H. Hoffman et C. Winder. 1999. *Aviation and exposure to toxic chemicals*. SAE Technical Paper.
- Beatty, A. L., T. J. Haight et R. F. Redberg. 2011. "Associations between respiratory illnesses and secondhand smoke exposure in flight attendants: A cross-sectional analysis of the Flight Attendant Medical Research Institute Survey." *Environmental Health: A Global Access Science Source* 10 (1). <https://doi.org/10.1186/1476-069X-10-81>.
- Bensefa-Colas, L. et J-U. Mullot. 2019. "La qualité de l'air à l'intérieur des cabines d'avion Événements feux/fumées lors des vols aériens : conséquences sur la qualité de l'air à l'intérieur des cabines d'avion et sur la santé des personnels navigants d'une flotte aérienne française." *Les cahiers de la Recherche : Santé, Environnement, Travail* (14): 42-43.
- Berger-Preiß, E., S. Gerling, H. Kock et K. E. Appel. 2006. "Investigations in the passenger cabin during application of biocides for disinsection." *Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft* 66 (3): 116-119.
- Berger-Preiß, E., W. Koch, W. Behnke, S. Gerling, H. Kock, L. Elflein et K. E. Appel. 2004. "In-flight spraying in aircrafts: Determination of the exposure scenario." *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 207 (5): 419-430. <https://doi.org/10.1078/1438-4639-00310>.
- Berglund, L. G. 1998. "Comfort and humidity." *ASHRAE Journal* 40 (8): 35-41.
- Blettner, M., H. Zeeb, A. Auvinen, T. J. Ballard, M. Caldora, H. Eliasch, M. Gundestrup, T. Haldorsen, N. Hammar, G. P. Hammer, D. Irvine, I. Langner, A. Paridou, E. Pukkala, V. Rafnsson, H. Storm, H. Tulinius, U. Tveten et A. Tzonou. 2003. "Mortality from cancer and other causes among male airline cockpit crew in Europe." *International Journal of Cancer* 106 (6): 946-952. <https://doi.org/10.1002/ijc.11328>.
- Bossard, M-L. 2017. "Qualité de l'air dans les avions : substances, concentrations et effets rapportés. Proposition de moyens d'échantillonnage pour une campagne de mesures à grande échelle.", UNIVERSITE CLAUDE BERNARD – LYON 1 FACULTE DE PHARMACIE - INSTITUT DES SCIENCES PHARMACEUTIQUES ET BIOLOGIQUES.
- Burdon, J., L. T. Budnik, X. Baur, G. Hageman, C. V. Howard, J. Roig, L. Coxon, C. E. Furlong, D. Gee, T. Loraine, A. V. Terry, J. Midavaine, H. Petersen, D. Bron, C. L. Soskolne et S. Michaelis. 2023. "Health consequences of exposure to aircraft contaminated air and fume events: a narrative review and medical protocol for the investigation of exposed aircrew and passengers." *Environmental Health* 22 (1): 43. <https://doi.org/10.1186/s12940-023-00987-8>.
- CAA. 2002. Safety regulation group - Flight operations department communication 21/2002. : Flight Operations Department, Aviation House, Gatwick Airport South, Gatwick West Sussex, RH6 0YR.
- CAA. 2004. *CAA Paper 2004/04 - Cabin air quality*, ed © Civil Aviation Authority 2004 (Consulté le 07/01/2022).
- Carletti, E., L. M. Schopfer, J. P. Colletier, M. T. Froment, F. Nachon, M. Weik, O. Lockridge et P. Masson. 2011. "Reaction of cresyl saligenin phosphate, the organophosphorus agent implicated in aerotoxic syndrome, with human cholinesterases: Mechanistic studies employing kinetics, mass spectrometry, and X-ray structure analysis." *Chemical Research in Toxicology* 24 (6): 797-808. <https://doi.org/10.1021/tx100447k>.
- Cashman, J. P., J. S. Nicholas, D. Lackland, L. C. Mohr, R. S. Woolson, G. Grones, J. K. Rodgers et J. B. Kilmer. 2007. "Mortality among airline pilots in the United States." *International Journal of Applied Aviation Studies* 7 (2): 202-210.

- CEN. 2022. *CEN/TR 17904 : November 2022 - Cabin air quality on civil aircraft - Chemical compounds.*
- Chaturvedi, A. K. 2011. "Aerospace toxicology overview: aerial application and cabin air quality." *Rev Environ Contam Toxicol* 214: 15-40. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0668-6_2.
- Chen, P. H., X. Liu, L. Dong et P. L. P. Rau. 2021. "Prevalence of musculoskeletal discomfort among female cabin crew in Taiwan." *Journal of Occupational Health* 63 (1). <https://doi.org/10.1002/1348-9585.12286>.
- Chen, R., L. Fang, J. Liu, B. Herbig, V. Norrefeldt, F. Mayer, R. Fox et P. Wargocki. 2021. "Cabin air quality on non-smoking commercial flights: A review of published data on airborne pollutants." *Indoor Air*. <https://doi.org/10.1111/ina.12831>.
- Christiansson, A., L. Hovander, I. Athanassiadis, K. Jakobsson et A. Bergman. 2008. "Polybrominated diphenyl ethers in aircraft cabins--a source of human exposure?" *Chemosphere* 73 (10): 1654-60. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.07.071>.
- Co, M. et A. Kwong. 2020. "Breast Cancer Rate and Mortality in Female Flight Attendants: A Systematic Review and Pooled Analysis." *Clinical Breast Cancer* 20 (5): 371-376. <https://doi.org/10.1016/j.clbc.2020.05.003>.
- Commission Européenne. 2011. "Règlement (UE) n o 1178/2011 de la Commission du 3 novembre 2011 déterminant les exigences techniques et les procédures administratives applicables au personnel navigant de l'aviation civile conformément au règlement (CE) n o 216/2008 du Parlement européen et du Conseil Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE."
- Copeland, K., W. Friedberg, F. E. Duke et J. S. Nicholas. 2011. "Radiation exposure of aircrews on commercial aircraft." Dans *Radiation Exposure in Medicine and the Environment: Risks and Protective Strategies*, 1-30. : Nova Science Publishers, Inc.
- Costa, L. G. 2018. "Organophosphorus compounds at 80: Some old and new issues." *Toxicological Sciences* 162 (1): 24-35. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfx266>.
- Cox, L. et S. Michaelis. 2002. "A survey of health symptoms in BAe 146 aircrew." *Journal of Occupational Health and Safety - Australia and New Zealand* 18 (4): 305-312.
- CRNPN. 2021. *Rapport de gestion synthétique Caisse de Retraite du Personnel Navigant de l'aéronautique civile*. <https://www.crpnp.fr/la-crpnp/le-rapport-de-gestion-et-les-comptes/>.
- Crump, D., P. Harrison et C. Walton. 2011a. "Aircraft cabin air sampling study; part 1 of the final report." : 120 p.
- Crump, D., P. Harrison et C. Walton. 2011b. "Aircraft cabin air sampling study; part 2 of the final report." : 319 p.
- da Silva, L. F., M. S. R. Porto, A. B. de Sousa et K. M. Avena. 2021. "Graduated compression stockings as a prophylactic measure in venous thromboembolism and edema of lower limbs triggered by air travel: A systematic review of clinical trials." *Jornal Vascular Brasileiro* 20. <https://doi.org/10.1590/1677-5449.200164>.
- Daniell, W. E., T. L. Vaughan et B. A. Millies. 1990. "Pregnancy outcomes among female flight attendants." *Aviation Space and Environmental Medicine* 61 (9): 840-844.
- Daughtrey, W., R. Biles, B. Jortner et M. Ehrich. 1996. "Subchronic delayed neurotoxicity evaluation of jet engine lubricants containing phosphorus additives." *Fundamental and Applied Toxicology* 32 (2): 244-249. <https://doi.org/10.1006/faat.1996.0127>.
- Day, G. A. 2015. "Aircraft cabin bleed air contaminants: A review." *Federal Aviation Administration: Report No. DOT/FAA/Am-15/20*.
- de Boer, J., A. Antelo, I. van der Veen, S. Brandsma et N. Lammertse. 2015. "Tricresyl phosphate and the aerotoxic syndrome of flight crew members - Current gaps in knowledge." *Chemosphere* 119: S58-S61. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.05.015>.
- de Ree, H., M. van den Berg, T. Brand, G. J. Mulder, R. Simons, B. Veldhuijzen van Zanten et R. H. Westerink. 2014. "Health risk assessment of exposure to TriCresyl Phosphates (TCPs) in aircraft: a commentary." *Neurotoxicology* 45: 209-15. <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2014.08.011>.

- Dechow, M., H. Sohn et J. Steinhanses. 1997. "Concentrations of selected contaminants in cabin air of airbus aircrafts." *Chemosphere* 35 (1-2): 21-31.
[https://doi.org/10.1016/s0045-6535\(97\)00135-5](https://doi.org/10.1016/s0045-6535(97)00135-5).
- DGAC-DSAC. 2020. Info sécurité DGAC n°2020/05 - Prévention des émanations ou des odeurs de fumées dans les cabines ou le poste de pilotage d'avions : bonnes pratiques et recommandations. : DGAC.
- Di Trolio, R., G. Di Lorenzo, B. Fumo et P. A. Ascierio. 2015. "Cosmic radiation and cancer: Is there a link?" *Future Oncology* 11 (7): 1123-1135.
<https://doi.org/10.2217/fon.15.29>.
- Dorandeu, F. et F. Nachon. 2017. "Des contre-mesures médicales face à la menace des neurotoxiques organophosphorés." *Biofutur* 2017: 42-45.
- Dreger, S., D. Wollschläger, T. Schafft, G. P. Hammer, M. Blettner et H. Zeeb. 2020. "Cohort study of occupational cosmic radiation dose and cancer mortality in German aircrew, 1960-2014." *Occupational and Environmental Medicine* 77 (5): 285-291.
<https://doi.org/10.1136/oemed-2019-106165>.
- Dupas, D. et M. A. Dagherne. 2013. "Syndrome d'intolérance aux odeurs chimiques (SIOC) : un diagnostic à ne pas manquer. Épidémiologie, diagnostic, traitement." *Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement* 74 (3): 305-310.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.admp.2013.03.003>.
- EASA. 2017a. *AVOIL Characterisation of the toxicity of aviation turbine engine oils after pyrolysis. Final report EASA_REP_RESEA_2015_2. Research project EASA.2015.HVP.23.* (EASA), 157 p.
- EASA. 2017b. *CAQ Preliminary cabin air quality measurement campaign. Final Report EASA_REP_RESEA_2014_4. Research Project: EASA.2014.C15 (CAQ) and EASA.2014.C15.SU01 (CAQ II).* (EASA), 130 p.
- EASA. 2020. Workshop on future Cabin Air Quality Research - 30th – 31st January 2020 - Koln, Germany.
- EASA. 2021. CS 25 - Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes - Amendment 27. édité par EASA.
- Ebbert, J. O., I. T. Croghan, D. R. Schroeder, J. Murawski et R. D. Hurt. 2007. "Association between respiratory tract diseases and secondhand smoke exposure among never smoking flight attendants: A cross-sectional survey." *Environmental Health: A Global Access Science Source* 6. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-6-28>.
- Erren, T. C., H. G. Pape, R. J. Reiter et C. Piekarski. 2008. "Chronodisruption and cancer." *Naturwissenschaften* 95 (5): 367-82. <https://doi.org/10.1007/s00114-007-0335-y>.
- European Commission. 2020a. *Deliverable 7.0 Final Report Overall Summary - 31 August 2020.* EASA, 151 p.
- European Commission. 2020b. *FACTS Task 3B: Toxicological Risk Assessment for Air Cabin Pollution - Public report.* EASA, 38 p.
- FAA. 2018. SAF 18003 - Procedures for Addressing Odors, Smoke and/or Fumes in Flight.
- FAA. 2020. *Aircraft Air Quality.*
- FAA. 2022. Aircraft Air Quality and Bleed Air Contamination Detection - DOT/FAA/TC-21/45 - final report.
- Farrauto, R. J. et J. N. Armor. 2016. "Moving from discovery to real applications for your catalyst." *Applied Catalysis A: General* 527: 182-189.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apcata.2016.09.008>.
- Fiedler, N., R. Laumbach, K. Kelly-McNeil, P. Liroy, Z. H. Fan, J. Zhang, J. Ottenweller, P. Ohman-Strickland et H. Kipen. 2005. "Health effects of a mixture of indoor air volatile organics, their ozone oxidation products, and stress." *Environmental Health Perspectives* 113 (11): 1542-1548. <https://doi.org/10.1289/ehp.8132>.
- Fink, C. A. et M. N. Bates. 2005. "Melanoma and ionizing radiation: Is there a causal relationship?" *Radiation Research* 164 (5): 701-710.
<https://doi.org/10.1667/RR3447.1>.
- Freudenthal, R. I., L. Rausch, J. M. Gerhart, M. L. Barth, C. R. Mackerer et E. C. Bisinger. 1993. "Subchronic neurotoxicity of oil formulations containing either tricresyl

- phosphate or tri-orthocresyl phosphate." *Journal of the American College of Toxicology* 12 (4): 409-416. <https://doi.org/10.1177/109158189301200410>.
- Fu, X., T. Lindgren et D. Norbäck. 2015. "Medical symptoms among pilots associated with work and home environments: A 3-year cohort study." *Aerospace Medicine and Human Performance* 86 (5): 458-465. <https://doi.org/10.3357/AMHP.4216.2015>.
- Furlong, C. E. 2011. "Exposure to triaryl phosphates: metabolism and biomarkers of exposure." *Journal of biological physics and chemistry: JBPC* 11.
- Giaconia, C., A. Orioli et A. Di Gangi. 2013. "Air quality and relative humidity in commercial aircrafts: An experimental investigation on short-haul domestic flights." *Building and Environment* 67: 69-81. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.05.006>.
- Goffeng, E. M., K. C. Nordby, M. Tarvainen, S. Järvelin-Pasanen, A. Wagstaff, Ø Skare et J. A. Lie. 2019. "Cardiac autonomic activity in commercial aircrew during an actual flight duty period." *Aerospace Medicine and Human Performance* 90 (11): 945-952. <https://doi.org/10.3357/AMHP.5389.2019>.
- Goldhagen, Paul. 2000. "Overview Of Aircraft Radiation Exposure And Recent Er-2 Measurements." *Health Physics* 79 (5): 526-544.
- Grajewski, B., E. A. Whelan, C. C. Lawson, M. J. Hein, M. A. Waters, J. L. Anderson, L. A. Macdonald, C. J. Mertens, C. Y. Tseng, R. T. Cassinelli et L. Luo. 2015. "Miscarriage among flight attendants." *Epidemiology* 26 (2): 192-203. <https://doi.org/10.1097/EDE.0000000000000225>.
- Guan, J., K. Gao, C. Wang, X. Yang, C. H. Lin, C. Lu et P. Gao. 2014. "Measurements of volatile organic compounds in aircraft cabins. Part I: Methodology and detected VOC species in 107 commercial flights." *Building and Environment* 72: 154-161. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.11.002>.
- Guan, J., Y. Jia, Z. Wei et X. Tian. 2019. "Temporal variations of ultrafine particle concentrations in aircraft cabin: A field study." *Building and Environment* 153: 118-127. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.02.025>.
- Gudmundsdottir, E. M., J. Hrafnkelsson et V. Rafnsson. 2017. "Incidence of cancer among licenced commercial pilots flying North Atlantic routes." *Environmental Health: A Global Access Science Source* 16 (1). <https://doi.org/10.1186/s12940-017-0295-4>.
- Hageman, G., T. M. Pal, J. Nihom, S. J. Mackenzie Ross et M. V. D. Berg. 2020. "Aerotoxic syndrome, discussion of possible diagnostic criteria." *Clinical Toxicology* 58 (5): 414-416. <https://doi.org/10.1080/15563650.2019.1649419>.
- Hageman, G., T. M. Pal, J. Nihom, S. J. Mackenzie Ross et M. van den Berg. 2020. "Three patients with probable aerotoxic syndrome." *Clinical Toxicology* 58 (2): 139-142. <https://doi.org/10.1080/15563650.2019.1616092>.
- Haldorsen, T., J. B. Reitan et U. Tveten. 2000. "Cancer incidence among Norwegian airline pilots." *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health* 26 (2): 106-111. <https://doi.org/10.5271/sjweh.519>.
- Hale, M. A. et J. A. Al-Seffar. 2009. "Preliminary report on aerotoxic syndrome (AS) and the need for diagnostic neurophysiological tests." *American journal of electroneurodiagnostic technology* 49 (3): 260-279. <https://doi.org/10.1080/1086508x.2009.11079726>.
- Hammer, G. P., A. Auvinen, B. L. De Stavola, B. Grajewski, M. Gundestrup, T. Haldorsen, N. Hammar, S. Lagorio, A. Linnarsjö, L. Pinkerton, E. Pukkala, V. Rafnsson, I. Dos-Santos-Silva, H. H. Storm, T. E. Strand, A. Tzonou, H. Zeeb et M. Blettner. 2014. "Mortality from cancer and other causes in commercial airline crews: A joint analysis of cohorts from 10 countries." *Occupational and Environmental Medicine* 71 (5): 313-322. <https://doi.org/10.1136/oemed-2013-101395>.
- Hammer, G. P., M. Blettner et H. Zeeb. 2009. "Epidemiological studies of cancer in aircrew." *Radiation Protection Dosimetry* 136 (4): 232-239. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncp125>.
- Härmä, M., J. Laitinen, M. Partinen et S. Suvanto. 1994. "The effect of four-day round trip flights over 10 time zones on the circadian variation of salivary melatonin and Cortisol in airline flight attendants." *Ergonomics* 37 (9): 1479-1489. <https://doi.org/10.1080/00140139408964927>.

- Hayes, K., D. Megson, A. Doyle et G. O'Sullivan. 2021. "Occupational risk of organophosphates and other chemical and radiative exposure in the aircraft cabin: A systematic review." *Science of the Total Environment* 796. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148742>.
- He, C., X. Wang, P. Thai, C. Baduel, C. Gallen, A. Banks, P. Bainton, K. English et J. F. Mueller. 2018. "Organophosphate and brominated flame retardants in Australian indoor environments: Levels, sources, and preliminary assessment of human exposure." *Environmental Pollution* 235: 670-679. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.12.017>.
- He, J., Y. Yin, X. Yang, J. Pei, Y. Sun, X. Cui et Q. Chen. 2021. "Carbon dioxide in passenger cabins: Spatial temporal characteristics and 30-year trends." *Indoor Air*. <https://doi.org/10.1111/ina.12874>.
- Heidecker, B., R. M. Spencer, V. Hayes, S. Hall, N. Parikh, E. O. Stock et R. Redberg. 2017. "High Prevalence and Clinical/Sociodemographic Correlates of Miscarriages Among Flight Attendants." *American Journal of Medicine* 130 (12): 1397-1401. <https://doi.org/10.1016/j.amjmed.2017.05.032>.
- Heutelbeck, A. R. R., C. Bornemann, M. Lange, A. Seeckts et M. M. Müller. 2016. "Acetylcholinesterase and neuropathy target esterase activities in 11 cases of symptomatic flight crew members after fume events." *Journal of Toxicology and Environmental Health - Part A: Current Issues* 79 (22-23): 1050-1056. <https://doi.org/10.1080/15287394.2016.1219561>.
- Hinds, W. C. 1999. *Aerosol technology: properties, measurement, and behavior of airborne particles*. 2nd ed. New York: John Wiley and Sons.
- Howard, C., S. Michaelis et A. Watterson. 2017. "The Aetiology of 'Aerotoxic Syndrome' - A Toxicopathological Viewpoint." *Open Access Journal of Toxicology* 1. <https://doi.org/10.19080/OAJT.2017.01.555575>.
- Howard, CV, DW Johnson, J Morton, S Michaelis, D Supplee et J Burdon. 2018. "Is a cumulative exposure to a background aerosol of nanoparticles part of the causal mechanism of aerotoxic syndrome." *Nanomedicine Nanosci Res* 139 (1).
- IARC. 2004. "Tobacco smoke and involuntary smoking." *IARC Monogr Eval Carcinog Risks Hum* 83: 1-1438.
- IARC. 2012. "Radiation." *IARC Monogr Eval Carcinog Risks Hum* 100D.
- IARC. 2020. "Night shift work." *IARC Monogr Identif Carcinog Hazards Hum* 124: 1 - 371.
- IATA. 2017. IATA Guidance for airline health and safety staff on the medical response to Cabin Air Quality Events (Smoke, Fumes/odours).
- Ihlebaek, C. et M. H. Rustad. 2022. "Psychosocial Job Strain and Musculoskeletal Pain in Cabin Crew—Does Gender Matter?" *International Journal of Aerospace Psychology* 32 (1): 54-63. <https://doi.org/10.1080/24721840.2021.1927733>.
- Irgens, Å, L. M. Irgens, J. B. Reitan, T. Haldorsen et U. Tveten. 2003. "Pregnancy outcome among offspring of airline pilots and cabin attendants." *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health* 29 (2): 94-99. <https://doi.org/10.5271/sjweh.710>.
- Isukapalli, S. S., S. Mazumdar, P. George, B. Wei, B. Jones et C. P. Weisel. 2013. "Computational fluid dynamics modeling of transport and deposition of pesticides in an aircraft cabin." *Atmos Environ (1994)* 68: 198-207. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.11.019>.
- Jackson, C. A. et L. Earl. 2006. "Prevalence of fatigue among commercial pilots." *Occupational Medicine* 56 (4): 263-268. <https://doi.org/10.1093/occmed/kql021>.
- Jacobson, B. F., M. Philippides, M. Malherbe et P. Becker. 2002. "Risk factors for deep vein thrombosis in short-haul cockpit crews: A prospective study." *Aviation Space and Environmental Medicine* 73 (5): 481-484.
- Johnson, David W et John E Hils. 2013. "Phosphate esters, thiophosphate esters and metal thiophosphates as lubricant additives." *Lubricants* 1 (4): 132-148.
- Kim, C., K. J. Kim et J. Lee. 2019. "Assessment of black carbon concentration as a potential measure of air quality at multi-purpose facilities." *Journal of Aerosol Science* 138. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2019.105450>.

- Krstev, S. et A. Knutsson. 2019. "Occupational Risk Factors for Prostate Cancer: A Meta-analysis." *J Cancer Prev* 24 (2): 91-111. <https://doi.org/10.15430/jcp.2019.24.2.91>.
- Kuipers, S., A. J. Schreijer, S. C. Cannegieter, H. R. Büller, F. R. Rosendaal et S. Middeldorp. 2007. "Travel and venous thrombosis: a systematic review." *J Intern Med* 262 (6): 615-34. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2796.2007.01867.x>.
- Kuipers, S., A. Venemans-Jellema, S. C. Cannegieter, M. van Haften, S. Middeldorp, H. R. Büller et F. R. Rosendaal. 2014. "The incidence of venous thromboembolism in commercial airline pilots: A cohort study of 2630 pilots." *Journal of Thrombosis and Haemostasis* 12 (8): 1260-1265. <https://doi.org/10.1111/jth.12627>.
- Kung, J., F. Chiappelli, O. O. Cajulis, R. Avezova, G. Kossan, L. Chew et C. A. Maida. 2010. "From Systematic Reviews to Clinical Recommendations for Evidence-Based Health Care: Validation of Revised Assessment of Multiple Systematic Reviews (R-AMSTAR) for Grading of Clinical Relevance." *Open Dent J* 4: 84-91. <https://doi.org/10.2174/1874210601004020084>.
- Lee, H., J. Wilbur, K. M. Conrad et D. Mokadam. 2006. "Work-related musculoskeletal symptoms reported by female flight attendants on long-haul flights." *Aviation Space and Environmental Medicine* 77 (12): 1283-1287.
- Lee, H., J. Wilbur, M. J. Kim et A. M. Miller. 2008. "Psychosocial risk factors for work-related musculoskeletal disorders of the lower-back among long-haul international female flight attendants." *Journal of Advanced Nursing* 61 (5): 492-502. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2648.2007.04511.x>.
- Lee, S. C., C. S. Poon, X. D. Li, F. Luk, M. Chang et S. Lam. 2000. "Air quality measurements on sixteen commercial aircraft." *ASTM Special Technical Publication* (1393): 45-55. <https://doi.org/10.1520/stp14487s>.
- Lee, W., M. Y. Kang et J. H. Yoon. 2019. "Cancer incidence among air transportation industry workers using the national cohort study of Korea." *International Journal of Environmental Research and Public Health* 16 (16). <https://doi.org/10.3390/ijerph16162906>.
- Li, Zheng, Jun Guan, Xudong Yang et Chao-Hsin Lin. 2014. "Source apportionment of airborne particles in commercial aircraft cabin environment: contributions from outside and inside of cabin." *Atmospheric Environment* 89: 119-128.
- Liljedhal, L. A., H. J. Retzer et W. N. Sullivan. 1976. "Aircraft disinsection: the physical and insecticidal characteristics of (+) phenothrin applied by aerosol at 'blocks away'." *Bulletin of the World Health Organization* 54 (4): 391-396.
- Lindgren, T. et D. Norbäck. 2002. "Cabin air quality: Indoor pollutants and climate during intercontinental flights with and without tobacco smoking." *Indoor Air* 12 (4): 263-272. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0668.2002.01121.x>.
- Lindgren, T., D. Norbäck et G. Wieslander. 2007. "Perception of cabin air quality in airline crew related to air humidification, on intercontinental flights." *Indoor Air* 17 (3): 204-210. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2006.00467.x>.
- Linarsjö, A., L. Å Brodin, C. Andersson, L. Alfredsson et N. Hammar. 2011. "Low mortality and myocardial infarction incidence among flying personnel during working career and beyond." *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health* 37 (3): 219-226. <https://doi.org/10.5271/sjweh.3134>.
- Liu, G. S., A. Cook, M. Richardson, D. Vail, F. C. Holsinger et I. Oakley-Girvan. 2018. "Thyroid cancer risk in airline cockpit and cabin crew: a meta-analysis." *Cancers Head Neck* 3: 7. <https://doi.org/10.1186/s41199-018-0034-8>.
- Liyasova, M., B. Li, L. M. Schopfer, F. Nachon, P. Masson, C. E. Furlong et O. Lockridge. 2011. "Exposure to tri-o-cresyl phosphate detected in jet airplane passengers." *Toxicology and Applied Pharmacology* 256 (3): 337-347. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2011.06.016>.
- Lockridge, Oksana. 2015. "Review of human butyrylcholinesterase structure, function, genetic variants, history of use in the clinic, and potential therapeutic uses." *Pharmacology & therapeutics* 148: 34-46.

- Maddalena, Randy et Thomas E McKone. 2008. "Insecticide Exposures on Commercial Aircraft: A Literature Review and Screening Level Assessment." *Lawrence Berkeley National Laboratory*: 43 p.
- Magann, E. F., S. P. Chauhan, J. D. Dahlke, S. S. McKelvey, E. M. Watson et J. C. Morrison. 2010. "Air travel and pregnancy outcomes: A review of pregnancy regulations and outcomes for passengers, flight attendants, and aviators." *Obstetrical and Gynecological Survey* 65 (6): 396-402.
<https://doi.org/10.1097/OGX.0b013e3181e572ae>.
- Marsillach, J., E. J. Hsieh, R. J. Richter, M. J. MacCoss et C. E. Furlong. 2013. "Proteomic analysis of adducted butyrylcholinesterase for biomonitoring organophosphorus exposures." *Chemico-Biological Interactions* 203 (1): 85-90.
<https://doi.org/10.1016/j.cbi.2012.10.019>.
- Marsillach, J., R. J. Richter, J. H. Kim, R. C. Stevens, M. J. MacCoss, D. Tomazela, S. M. Suzuki, L. M. Schopfer, O. Lockridge et C. E. Furlong. 2011. "Biomarkers of organophosphorus (OP) exposures in humans." *NeuroToxicology* 32 (5): 656-660.
<https://doi.org/10.1016/j.neuro.2011.06.005>.
- McNeely, E., S. Gale, I. Tager, L. Kincl, J. Bradley, B. Coull et S. Hecker. 2014. "The self-reported health of U.S. flight attendants compared to the general population." *Environmental Health: A Global Access Science Source* 13 (1).
<https://doi.org/10.1186/1476-069X-13-13>.
- McNeely, E., I. Mordukhovich, S. Staffa, S. Tideman et B. Coull. 2019. "Legacy health effects among never smokers exposed to occupational secondhand smoke." *PLoS ONE* 14 (4). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215445>.
- McNeely, E., I. Mordukhovich, S. Staffa, S. Tideman, S. Gale et B. Coull. 2018. "Cancer prevalence among flight attendants compared to the general population." *Environmental Health: A Global Access Science Source* 17 (1).
<https://doi.org/10.1186/s12940-018-0396-8>.
- Megson, David, Saeed Hajimirzaee, Aidan Doyle, Frank Cannon et Jean-Christophe Balouet. 2019. "Investigating the potential for transisomerisation of trycresyl phosphate with a palladium catalyst and its implications for aircraft cabin air quality." *Chemosphere* 215: 532-534.
- Michaelis, S. 2010. "Health and flight safety implications from exposure to contaminated air in aircraft." The University of New South Wales.
<http://dx.doi.org/https://doi.org/10.26190/unsworks/23524>.
- Michaelis, S., J. Burdon et C. V. Howard. 2017. "AEROTOXIC SYNDROME: A NEW OCCUPATIONAL DISEASE?" *Health Panorama* 3: 198-211.
- Michaelis, S., T. Loraine et C. V. Howard. 2021. "Ultrafine particle levels measured on board short-haul commercial passenger jet aircraft." *Environmental Health: A Global Access Science Source* 20 (1). <https://doi.org/10.1186/s12940-021-00770-7>.
- Miura, K., C. M. Olsen, S. Rea, J. Marsden et A. C. Green. 2019. "Do airline pilots and cabin crew have raised risks of melanoma and other skin cancers? Systematic review and meta-analysis." *British Journal of Dermatology* 181 (1): 55-64.
<https://doi.org/10.1111/bjd.17586>.
- Mizukoshi, A., K. Azuma, S. Sugiyama, D. Tanaka, M. Inoue, M. Tokumura et J. Okumura. 2018. "Reaction between ozone and limonene under reduced pressure conditions simulating an aircraft cabin environment." 15th Conference of the International Society of Indoor Air Quality and Climate, INDOOR AIR 2018.
- Mizukoshi, A., K. Azuma, S. Sugiyama, D. Tanaka, M. Inoue, M. Tokumura et J. Okumura. 2019. "Effects of reduced pressure on the reaction between ozone and limonene in a simulated aircraft cabin environment." *Building and Environment* 163.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106320>.
- Moir, I. et A.G. Seabridge. 2008. *Aircraft Systems: Mechanical, Electrical, and Avionics Subsystems Integration*. American Institute of Aeronautics and Astronautics.

- Moshkowitz, M., O. Toledano, L. Galazan, A. Hallak, N. Arber et E. Santo. 2014. "Incidence of colorectal neoplasms among male pilots." *World Journal of Gastroenterology* (27): 9116-9120. <https://doi.org/10.3748/wjg.v20.i27.9116>.
- Muir, H., C. Walton et R. Mckeown. 2008. *Cabin Air Sampling Study Functionality Test*. Cranfield University School of Engineering.
- Nagda, N. L. 2001. "Low relative humidity and aircraft cabin air quality." *Indoor Air* 11 (3): 200-214. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0668.2001.011003200.x>.
- Nagda, N. L., M. D. Koontz, A. G. Konheim et S. Katharine Hammond. 1992. "Measurement of cabin air quality aboard commercial airliners." *Atmospheric Environment Part A, General Topics* 26 (12): 2203-2210. [https://doi.org/10.1016/0960-1686\(92\)90409-E](https://doi.org/10.1016/0960-1686(92)90409-E).
- Nagda, N. L. et H. E. Rector. 2003. "A critical review of reported air concentrations of organic compounds in aircraft cabins." *Indoor Air* 13 (3): 292-301. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0668.2003.00202.x>.
- Nagda, N.L., Inc Energen Consulting, Refrigerating American Society of Heating, Air-Conditioning Engineers et ASHRAE 959-RP Project Team. 2001. *Determine Aircraft Supply Air Contaminants in the Engine Bleed Air Supply System on Commercial Aircraft*. Energen Consulting, Incorporated.
- Nicholas, J. S., C. J. Swearingen et J. B. Kilmer. 2009. "Predictors of skin cancer in commercial airline pilots." *Occupational Medicine* 59 (6): 434-436. <https://doi.org/10.1093/occmed/kqp058>.
- NRC. 1986. *The Airliner Cabin Environment: Air Quality and Safety*. Washington, DC: The National Academies Press.
- NRC. 2002. "The Airliner Cabin Environment and the Health of Passengers and Crew." Washington (DC): National Academies Press (US)
- Copyright 2002 by the National Academy of Sciences. All rights reserved.
- O'Brien, K. et W. Friedberg. 1994. "Atmospheric cosmic rays at aircraft altitudes." *Environment International* 20 (5): 645-663. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0160-4120\(94\)90011-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0160-4120(94)90011-6).
- OACI. 2015. *Cir 344-AN/202 - Orientations sur les pratiques éducatives, de formation et de compte rendu concernant les émanations*. ORGANISATION DE L'AVIATION CIVILE INTERNATIONALE - 999, boul. Robert-Bourassa, Montréal (Québec) H3C 5H7 Canada.
- OHRCA. 2009. *Exposure to aircraft bleed air contaminants among airline workers - A guide for health care providers.*, 27p.
- OHRCA. 2014. *Cabin Air Quality Incidents Project Report*. Occupational Health Research Consortium in Aviation. <http://www.ohrca.org/wp-content/uploads/2014/08/finalreport.pdf>.
- Olsen, C. M., K. Miura, J. C. Dusingize, I. Hosegood, R. Brown, M. Drane, P. Clem, J. Marsden, R. Tinker, K. Karipidis, M. Coroneo et A. C. Green. 2019. "Melanoma incidence in Australian commercial pilots, 2011-2016." *Occupational and Environmental Medicine* 76 (7): 462-466. <https://doi.org/10.1136/oemed-2018-105676>.
- Omana, M. A., G. W. Mann, B. W. Jones et S. J. Eckels. 2016. "Persistence of bleed-air contaminants on high-efficiency particulate arrestance filters." *Journal of Aircraft* 53 (5): 1572-1575. <https://doi.org/10.2514/1.C033762>.
- Pang, A. M., S. Gay, R. Yadav, C. Dolea, C. Ponce, R. Velayudhan, A. Grout, J. Fehr, A. Plenge-Boenig et P. Schlagenhauf. 2020. "The safety and applicability of synthetic pyrethroid insecticides for aircraft disinsection: A systematic review." *Travel Medicine and Infectious Disease* 33. <https://doi.org/10.1016/j.tmaid.2020.101570>.
- Paretzke, H. G. et W. Heinrich. 1993. "Radiation exposure and radiation risk in civil aircraft." *Radiation Protection Dosimetry* 48 (1): 33-40.
- Pasha, T. et P. R. A. Stokes. 2018. "Reflecting on the Germanwings disaster: A systematic review of depression and suicide in commercial airline pilots." *Frontiers in Psychiatry* 9 (MAR). <https://doi.org/10.3389/fpsy.2018.00086>.

- Pinkerton, L. E., M. J. Hein, J. L. Anderson, A. Christianson, M. P. Little, A. J. Sigurdson et M. K. Schubauer-Berigan. 2018. "Melanoma, thyroid cancer, and gynecologic cancers in a cohort of female flight attendants." *American Journal of Industrial Medicine* 61 (7): 572-581. <https://doi.org/10.1002/ajim.22854>.
- Pinkerton, L. E., M. J. Hein, J. L. Anderson, M. P. Little, A. J. Sigurdson et M. K. Schubauer-Berigan. 2016. "Breast cancer incidence among female flight attendants: Exposure–response analyses." *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health* 42 (6): 538-546. <https://doi.org/10.5271/SJWEH.3586>.
- Pringle, R. B., E. C. Meek, H. W. Chambers et J. E. Chambers. 2018. "Neuroprotection From Organophosphate-Induced Damage by Novel Phenoxyalkyl Pyridinium Oximes in Rat Brain." *Toxicol Sci* 166 (2): 420-427. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfy212>.
- Prombumroong, J., P. Janwantanakul et P. Pensri. 2011. "Prevalence of and biopsychosocial factors associated with low back pain in commercial airline pilots." *Aviation Space and Environmental Medicine* 82 (9): 879-884. <https://doi.org/10.3357/ASEM.3044.2011>.
- PubChem, [Internet]., MD: Bethesda, National Library of Medicine (US) et National Center for Biotechnology Information;. 2004. PubChem Compound Summary for CID 6529, Tricresyl phosphate. Available from: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Tricresyl-phosphate>.
- Pukkala, E., R. Aspholm, A. Auvinen, H. Eliasch, M. Gundestrup, T. Haldorsen, N. Hammar, J. Hrafnkelsson, P. Kyyrönen, A. Linnarsjö, V. Rafnsson, H. Storm et U. Tveten. 2003. "Cancer incidence among 10,211 airline pilots: A nordic study." *Aviation Space and Environmental Medicine* 74 (7): 699-706.
- Radowicka, M., B. Pietrzak et M. Wielgoś. 2013. "Assessment of the occurrence of menstrual disorders in female flight attendants -preliminary report and literature review." *Neuroendocrinology Letters* 34 (8): 809-813.
- Radowicka, M., B. Pietrzak et M. Wielgoś. 2021. "Prolactin secretion pattern among female flight attendants." *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health* 34 (3): 351-361. <https://doi.org/10.13075/IJOMEH.1896.01655>.
- Raslau, D., A. M. A. Dabrh, D. T. Summerfield, Z. Wang, L. W. Steinkraus et M. H. Murad. 2016. "Prostate cancer in pilots." *Aerospace Medicine and Human Performance* 87 (6): 565-570. <https://doi.org/10.3357/AMHP.4453.2016>.
- Rayman, R. B. 1997. "Passenger safety, health, and comfort: A review." *Aviation Space and Environmental Medicine* 68 (5): 432-440.
- Rayman, R. B. et G. B. McNaughton. 1983. "Hypoxia: USAF experience 1970-1980." *Aviation Space and Environmental Medicine* 54 (4): 357-359.
- Reddy, P., P. A. Shewokis et K. Izzetoglu. 2022. "Individual differences in skill acquisition and transfer assessed by dual task training performance and brain activity." *Brain Inform* 9 (1): 9. <https://doi.org/10.1186/s40708-022-00157-5>.
- Reinen, J., L. Nematollahi, A. Fidder, N. P. E. Vermeulen, D. Noort et J. N. M. Commandeur. 2015. "Characterization of human cytochrome P450s involved in the bioactivation of tri-Ortho-Cresyl phosphate (ToCP)." *Chemical Research in Toxicology* 28 (4): 711-721. <https://doi.org/10.1021/tx500490v>.
- Reneman, L., S. B. Schagen, M. Mulder, H. J. Mutsaerts, G. Hageman et M. B. de Ruiter. 2016. "Cognitive impairment and associated loss in brain white microstructure in aircrew members exposed to engine oil fumes." *Brain Imaging and Behavior* 10 (2): 437-444. <https://doi.org/10.1007/s11682-015-9395-3>.
- Repace, J.. 2004. "Flying the smoky skies: secondhand smoke exposure of flight attendants." *Tobacco Control* 13 (suppl 1): i8. <https://doi.org/10.1136/tc.2003.003111>.
- Reynolds, P., J. Cone, M. Layefsky, D. E. Goldberg et S. Hurley. 2002. "Cancer incidence in California flight attendants (United States)." *Cancer Causes and Control* 13 (4): 317-324. <https://doi.org/10.1023/A:1015284014563>.
- Richardson, Rudy J, John K Fink, R Mark Worden, Sanjeeva J Wijeyesakere et Galina F Makhaeva. 2020. "Neuropathy target esterase as a biomarker and biosensor of

- delayed neuropathic agents." Dans *Handbook of toxicology of chemical warfare agents*, 1005-1025. : Academic Press.
- Rivera-Rios, J. C., T. Joo, M. Takeuchi, T. M. Orlando, T. Bevington, J. W. Mathis, C. D. Pert, B. A. Tyson, T. M. Anderson-Lennert, J. A. Smith et N. L. Ng. 2021. "In-flight particulate matter concentrations in commercial flights are likely lower than other indoor environments." *Indoor Air*. <https://doi.org/10.1111/ina.12812>.
- RIVM. 2022. "Nationale Adviesgroep Cabinelucht." <https://www.rivm.nl/vliegtuigcabine-luchtkwaliteit/nationale-adviesgroep-cabinelucht>.
- Roig, J., C. Domingo, J. Burdon et S. Michaelis. 2021. "Irritant-induced Asthma Caused by Aerotoxic Syndrome." *Lung* 199 (2): 165-170. <https://doi.org/10.1007/s00408-021-00431-z>.
- Rosenberger, W. 2018. "Effect of charcoal equipped HEPA filters on cabin air quality in aircraft. A case study including smell event related in-flight measurements." *Building and Environment* 143: 358-365. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.07.031>.
- Rosenberger, W., B. Beckmann et R. Wrbitzky. 2016. "Airborne aldehydes in cabin-air of commercial aircraft: Measurement by HPLC with UV absorbance detection of 2,4-dinitrophenylhydrazones." *Journal of Chromatography B: Analytical Technologies in the Biomedical and Life Sciences* 1019: 117-127. <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2015.08.046>.
- Runeson-Broberg, R., T. Lindgren et D. Norbäck. 2014. "Musculoskeletal symptoms and psychosocial work environment, among Swedish commercial pilots." *International Archives of Occupational and Environmental Health* 87 (7): 685-693. <https://doi.org/10.1007/s00420-013-0911-8>.
- Sanlorenzo, M., M. R. Wehner, E. Linos, J. Kornak, W. Kainz, C. Posch, I. Vujic, K. Johnston, D. Gho, G. Monico, J. T. McGrath, S. Osella-Abate, P. Quaglino, J. E. Cleaver et S. Ortiz-Urda. 2015. "The risk of melanoma in airline pilots and cabin crew: A meta-analysis." *JAMA Dermatology* 151 (1): 51-58. <https://doi.org/10.1001/jamadermatol.2014.1077>.
- Sarwar, G., R. Corsi, D. Allen et C. Weschler. 2003. "The significance of secondary organic aerosol formation and growth in buildings: Experimental and computational evidence." *Atmospheric Environment* 37 (9-10): 1365-1381. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)01013-0](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)01013-0).
- Schopfer, L. M., C. E. Furlong et O. Lockridge. 2010. "Development of diagnostics in the search for an explanation of aerotoxic syndrome." *Analytical Biochemistry* 404 (1): 64-74. <https://doi.org/10.1016/j.ab.2010.04.032>.
- Schuchardt, S., W. Koch et W. Rosenberger. 2019. "Cabin air quality – Quantitative comparison of volatile air contaminants at different flight phases during 177 commercial flights." *Building and Environment* 148: 498-507. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.11.028>.
- Shea, B. J., B. C. Reeves, G. Wells, M. Thuku, C. Hamel, J. Moran, D. Moher, P. Tugwell, V. Welch, E. Kristjansson et D. A. Henry. 2017. "AMSTAR 2: a critical appraisal tool for systematic reviews that include randomised or non-randomised studies of healthcare interventions, or both." *Bmj* 358: j4008. <https://doi.org/10.1136/bmj.j4008>.
- Shehadi, M., B. Jones et M. Hosni. 2016. "Characterization of the frequency and nature of bleed air contamination events in commercial aircraft." *Indoor Air* 26 (3): 478-88. <https://doi.org/10.1111/ina.12211>.
- Sigurdson, A. J. et E. Ron. 2004. "Cosmic radiation exposure and cancer risk among flight crew." *Cancer Investigation* 22 (5): 743-761. <https://doi.org/10.1081/CNV-200032767>.
- Silverman, D. et M. Gendreau. 2009. "Medical issues associated with commercial flights." *The Lancet* 373 (9680): 2067-2077. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(09\)60209-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(09)60209-9).
- Solbu, K., H. L. Daae, R. Olsen, S. Thorud, D. G. Ellingsen, T. Lindgren, B. Bakke, E. Lundanes et P. Molander. 2011. "Organophosphates in aircraft cabin and cockpit air--method development and measurements of contaminants." *J Environ Monit* 13 (5): 1393-403. <https://doi.org/10.1039/c0em00763c>.

- Spicer, C.W., M.J. Murphy, M.W. Holdren, J.D. Myers, I.C. MacGregor, C. Holloman, R.R. James, K Tucker, . et R.. Zaborski. 2004. *Relate Air Quality and Other Factors to Comfort and Health Symptoms Reported by Passengers and Crew on Commercial Transport Aircraft (Part I) (ASHRAE Project 1262-TRP)*;
- Stavola, B. L. D., C. Pizzi, F. Clemens, S. A. Evans, A. D. Evans et I. D. S. Silva. 2012. "Cause-specific mortality in professional flight crew and air traffic controllers: Findings from two UK population-based cohorts of over 20,000 subjects." *International Archives of Occupational and Environmental Health* 85 (3): 283-293. <https://doi.org/10.1007/s00420-011-0660-5>.
- Strid, A., G. Smedje, I. Athanassiadis, T. Lindgren, H. Lundgren, K. Jakobsson et Å Bergman. 2014. "Brominated flame retardant exposure of aircraft personnel." *Chemosphere* 116: 83-90. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.03.073>.
- Sullivan, W. N., J. Keiding et J. W. Wright. 1962. "Studies on aircraft disinsection at "blocks away"." *Bull World Health Organ* 27 (2): 263-73.
- Sykes, A. J., P. D. Larsen, R. F. Griffiths et S. Aldington. 2012. "A study of airline pilot morbidity." *Aviat Space Environ Med* 83 (10): 1001-5. <https://doi.org/10.3357/ase.3380.2012>.
- Tacal, O. et L. M. Schopfer. 2014. "Healthy F-16 pilots show no evidence of exposure to tri-ortho-cresyl phosphate through the on-board oxygen generating system." *Chemico-Biological Interactions* 215 (1): 69-74. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2014.03.004>.
- Tamás, G., C. J. Weschler, Z. Bakó-Biró, D. P. Wyon et P. Strøm-Tejsen. 2006. "Factors affecting ozone removal rates in a simulated aircraft cabin environment." *Atmospheric Environment* 40 (32): 6122-6133. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.05.034>.
- Targino, A. C., B. L. F. Machado et P. Krecl. 2017. "Concentrations and personal exposure to black carbon particles at airports and on commercial flights." *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 52: 128-138. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.03.003>.
- Tashkin, D. P., A. H. Coulson, M. S. Simmons et G. H. Spivey. 1983. "Respiratory symptoms of flight attendants during high-altitude flight: Possible relation to cabin ozone exposure." *International Archives of Occupational and Environmental Health* 52 (2): 117-137. <https://doi.org/10.1007/BF00405416>.
- Telle-Lamberton, M. 2005. "Epidemiologic studies on workers exposed to low doses of ionizing radiation." *Archives des Maladies Professionnelles et de Medecine du Travail* 66 (2): 150-164.
- Thiermann, H., T. Seeger, S. Gonder, N. Herkert, B. Antkowiak, T. Zilker, F. Eyer et F. Worek. 2010. "Assessment of neuromuscular dysfunction during poisoning by organophosphorus compounds." *Chem Biol Interact* 187 (1-3): 265-9. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2009.12.027>.
- Tokumaru, O., K. Haruki, K. Bacal, T. Katagiri, T. Yamamoto et Y. Sakurai. 2006. "Incidence of cancer among female flight attendants: A meta-analysis." *Journal of Travel Medicine* 13 (3): 127-132. <https://doi.org/10.1111/j.1708-8305.2006.00029.x>.
- UNSCEAR. 2008. Sources and effects of ionizing radiation. UNSCEAR 2008. Report to the General Assembly with scientific annexes. Volume 1. New York, USA: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations. Available from: https://www.unscear.org/docs/reports/2008/09-86753_Report_2008_GA_Report.pdf.
- Van Netten, C. 1998. "Air quality and health effects associated with the operation of bae 146-200 aircraft." *Applied Occupational and Environmental Hygiene* 13 (10): 733-739. <https://doi.org/10.1080/1047322X.1998.10390150>.
- Van Netten, C. 1999. "Multi-elemental analysis of jet engine lubricating oils and hydraulic fluids and their implication in aircraft air quality incidents." *Sci Total Environ* 229 (1-2): 125-9. [https://doi.org/10.1016/s0048-9697\(99\)00060-1](https://doi.org/10.1016/s0048-9697(99)00060-1).
- Van Netten, C. 2000. "Analysis of two jet engine lubricating oils and a hydraulic fluid: Their pyrolytic breakdown products and their implication on aircraft air quality." *ASTM Special Technical Publication* (1393): 61-70.

- van Netten, C. 2002. "Analysis and implications of aircraft disinsectants." *Science of The Total Environment* 293 (1): 257-262. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(02\)00036-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00036-0).
- Vaughan, T. L., J. R. Daling et P. M. Starzyk. 1984. "Fetal death and maternal occupation. An analysis of birth records in the State of Washington." *J Occup Med* 26 (9): 676-8.
- Vetter, Céline. 2020. "Circadian disruption: What do we actually mean?" *European Journal of Neuroscience* 51 (1): 531-550. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/ejn.14255>.
- Wang, C., X. Yang, J. Guan, K. Gao et Z. Li. 2014. "Volatile organic compounds in aircraft cabin: Measurements and correlations between compounds." *Building and Environment* 78: 89-94. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.04.016>.
- Wei, Binnian, Sastry S. Isukapalli et Clifford P. Weisel. 2013. "Studying permethrin exposure in flight attendants using a physiologically based pharmacokinetic model." *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology* 23 (4): 416-427. <https://doi.org/10.1038/jes.2013.12>.
- Weschler, C. J. 2004. "New Directions: Ozone-initiated reaction products indoors may be more harmful than ozone itself." *Atmospheric Environment* 38 (33): 5715-5716. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.08.001>.
- Weschler, C. J. 2011. "Chemistry in indoor environments: 20 years of research." *Indoor Air* 21 (3): 205-18. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2011.00713.x>.
- Weschler, C. J., A. Wisthaler, S. Cowlin, G. Tamás, P. Strøm-Tejsten, A. T. Hodgson, H. Destailats, J. Herrington, J. Zhang et W. W. Nazaroff. 2007. "Ozone-initiated chemistry in an occupied simulated aircraft cabin." *Environmental Science and Technology* 41 (17): 6177-6184. <https://doi.org/10.1021/es0708520>.
- Whelan, E. A., C. C. Lawson, B. Grajewski, M. R. Petersen, L. E. Pinkerton, E. M. Ward et T. M. Schnorr. 2003. "Prevalence of respiratory symptoms among female flight attendants and teachers." *Occupational and Environmental Medicine* 60 (12): 929-934. <https://doi.org/10.1136/oem.60.12.929>.
- WHO. 1985. "RECOMMENDATIONS ON THE DISINSECTING OF AIRCRAFT : Procedure for disinsection of aircraft by application of a residual insecticide film = RECOMMANDATIONS POUR LA DÉSINSECTISATION DES AÉRONEFS : Procédure de désinsectisation des aéronefs par application d'un insecticide à effet rémanent." *Weekly Epidemiological Record = Relevé épidémiologique hebdomadaire* 60 (7): 45-47.
- WHO. 1998. "Recommendations on the Disinsecting of Aircraft = Recommandations sur la désinsectisation des aéronefs." *Weekly Epidemiological Record = Relevé épidémiologique hebdomadaire* 73 (15): 109-111.
- WHO. 2021. *WHO aircraft disinsection methods and procedures*. Geneva: World Health Organization.
- WHO, Disinsection Informal Consultation on Aircraft, Unit World Health Organization. Promotion of Chemical Safety et Safety International Programme on Chemical. 1995. Report on the Informal consultation on Aircraft Disinsection, Geneva, 6-10 November 1995. Geneva: World Health Organization.
- Wieslander, G., T. Lindgren, D. Norbäck et P. Venge. 2000. "Changes in the ocular and nasal signs and symptoms of aircrews in relation to the ban on smoking on intercontinental flights." *Scand J Work Environ Health* 26 (6): 514-22. <https://doi.org/10.5271/sjweh.576>.
- Wilson, J. W. 2000. "Overview Of Radiation Environments And Human Exposures." *Health Physics* 79 (5): 470-494.
- Winder, C et S Michaelis. 2005. "Crew effects from toxic exposures on aircraft." *Air Quality in Airplane Cabins and Similar Enclosed Spaces*: 229-248.
- Winder, C. 2010. *Aerotoxic Syndrom*. The University of New South Wales (The University of New South Wales).
- Winder, C. et J-C. Balouet. 2000. "Aerotoxic syndrome: adverse health effects following exposure to jet oil mist during commercial flights." Proc. Intl Congress on Occupational Health.

- Winder, C. et J-C. Balouet. 2002. "The toxicity of commercial jet oils." *Environmental research* 89 (2): 146-164.
- Winder, C. et J. C. Balouet. 2001. "Aircrew exposure to chemicals in aircraft: Symptoms of irritation and toxicity." *Journal of Occupational Health and Safety - Australia and New Zealand* 17 (5): 471-483.
- Winder, C., P. Fonteyn et J. C. Balouet. 2002. "Aerotoxic syndrome: A descriptive epidemiological survey of aircrew exposed to incabin airborne contaminants." *Journal of Occupational Health and Safety - Australia and New Zealand* 18 (4): 321-338.
- Wisthaler, A., G. Tamás, D. P. Wyon, P. Strøm-Tejsen, D. Space, J. Beauchamp, A. Hansel, T. D. Märk et C. J. Weschler. 2005. "Products of ozone-initiated chemistry in a simulated aircraft environment." *Environ Sci Technol* 39 (13): 4823-32. <https://doi.org/10.1021/es047992j>.
- Witter, R. F., T. B. Gaines, J. G. Short, V. A. Sedlak et D. R. Maddock. 1961. "Studies on the safety of DDVP for the disinsection of commercial aircraft." *Bull World Health Organ* 24 (4-5): 635-42.
- Worek, F., H. Thiermann, L. Szinicz et P. Eyer. 2004. "Kinetic analysis of interactions between human acetylcholinesterase, structurally different organophosphorus compounds and oximes." *Biochem Pharmacol* 68 (11): 2237-48. <https://doi.org/10.1016/j.bcp.2004.07.038>.
- Yin, Y., J. He, J. Pei, X. Yang, Y. Sun, X. Cui, C. H. Lin, D. Wei et Q. Chen. 2021. "Influencing factors of carbonyl compounds and other VOCs in commercial airliner cabins: On-board investigation of 56 flights." *Indoor Air*. <https://doi.org/10.1111/ina.12903>.
- Yin, Y., J. He, L. Zhao, J. Pei, X. Yang, Y. Sun, X. Cui, C. H. Lin, D. Wei et Q. Chen. 2022. "Identification of key volatile organic compounds in aircraft cabins and associated inhalation health risks." *Environment International* 158. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106999>.
- Yong, L. C., L. E. Pinkerton, J. H. Yiin, J. L. Anderson et J. A. Deddens. 2014. "Mortality among a cohort of U.S. commercial airline cockpit crew." *American Journal of Industrial Medicine* 57 (8): 906-914. <https://doi.org/10.1002/ajim.22318>.
- Yousif, L., M. Blettner, G. P. Hammer et H. Zeeb. 2010. "Testicular cancer risk associated with occupational radiation exposure: A systematic literature review." *Journal of Radiological Protection* 30 (3): 389-406. <https://doi.org/10.1088/0952-4746/30/3/R01>.
- Yu, N., Y. Zhang, M. Zhang et H. Li. 2021. "Thermal condition and air quality investigation in commercial airliner cabins." *Sustainability (Switzerland)* 13 (13). <https://doi.org/10.3390/su13137047>.
- Zeeb, H., M. Blettner, I. Langner, G. P. Hammer, T. J. Ballard, M. Santaquilani, M. Gundestrup, H. Storm, T. Haldorsen, U. Tveten, N. Hammar, A. Linnarsjö, E. Velonakis, A. Tzonou, A. Auvinen, E. Pukkala, V. Rafnsson et J. Hrafnkelsson. 2003. "Mortality from cancer and other causes among airline cabin attendants in Europe: A collaborative cohort study in eight countries." *American Journal of Epidemiology* 158 (1): 35-46. <https://doi.org/10.1093/aje/kwg107>.
- Zhai, S., Z. Li et B. Zhao. 2014. "State-space analysis of influencing factors on airborne particle concentration in aircraft cabins." *Building and Environment* 74: 13-21. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.12.019>.
- Zhang, Yong, Sastry Isukapalli, Panos Georgopoulos et Clifford Weisel. 2013. "Modeling Flight Attendants' Exposures to Pesticide in Disinsected Aircraft Cabins." *Environmental Science & Technology* 47 (24): 14275-14281. <https://doi.org/10.1021/es403613h>.

ANNEXES

Annexe 1. Lettre de saisine



COURRIER ARRIVE

23 AVR. 2019

DIRECTION GENERALE

2019-SA-0075**ANSES** (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail)Monsieur **Roger Genet**, Directeur Général
14 rue Pierre et Marie Curie
94701 Maisons-Alfort Cedex

Paris le : 17 avril 2019

Objet : Saisine de l'ANSES par la CFDT

Monsieur le Directeur Général,

Ces dernières années le nombre de personnels navigants, dont la santé a été impactée par la pollution de l'air respiré à bord des avions, est en constante augmentation. Plusieurs autorités aéronautiques telles que la FAA (Fédéral Aviation Administration) ou l'OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale) ont émis des alertes ou des recommandations sur le sujet afin de garantir la sécurité des personnes.

Malheureusement, le Syndicat des Pilotes de Ligne (SPL) fait le constat que ces alertes ou ces recommandations ne sont pas suivies de faits. La raison principale vient d'études qui ont été réalisées uniquement en fonctionnement "normal", sans aucune défaillance du système et qui concluent hâtivement à une absence de danger pour la santé.

La Cfdt, à la demande du syndicat des pilotes de ligne a donc décidé de saisir l'ANSES, afin que les études existantes soient complétées pour obtenir des explications scientifiques sur les effets constatés aussi bien dans les cas de contaminations chroniques que dans les cas de contaminations aiguës.

Le système de conditionnement d'air des avions de lignes utilise de l'air qui est directement prélevé sur les compresseurs des réacteurs. De part cette conception, en cas de fuite au niveau des joints de paliers, de l'huile de lubrification peut contaminer l'air destiné à être respiré. Il n'y a pas de système de filtration à ce niveau. Dans les épisodes de fuites importantes, le terme anglais « fume event » est utilisé pour qualifier ces émanations.

Confédération Française Démocratique du Travail

4 boulevard de la Villette 75955 Paris cedex 19

Tél : 01 42 03 80 00 - fax 01 42 03 85 73

www.cfdt.fr - e-mail : confederation@cfdt.fr

L'huile contient des additifs permettant un fonctionnement sur de grandes plages de températures. Parmi ces composés, on peut noter, entre autres, la présence de Tri-crésyl phosphate (TCP) CAS 1330-78-5 (phosphate de tritolye – fiche INRS et fiche de sécurité BP2380 en annexes) qui est un neurotoxiques. De plus cette huile est pyrolysée, ce qui crée de nouveaux composés. Bien que les inquiétudes se tournent principalement vers l'huile moteur, l'impact des fluides hydrauliques, des liquides de dégivrages, ou des hydrocarbures ne peut être ignoré.

Dans le rapport officiel "Preliminary Cabin Air Quality Measurement Campaign" de l'EASA (Agence Européenne de Sécurité Aérienne), il est établi que l'air respiré par les occupants contient un grand nombre de polluants, dont certains classés toxiques pour la santé. Pris individuellement, chaque composé mesuré est en quantité inférieure aux normes en vigueur. Il est à rappeler que ces mesures ont été effectuées lors d'un fonctionnement "normal", ne présentant pas de défaillance du système, ni de « fume event ».

Malgré les conclusions du rapport de l'EASA, le SPL constate une autre réalité sur le terrain. En effet nombreux navigants ont des problèmes de santé, conduisant pour certains, à la perte de leur aptitude médicale. Ils ont des difficultés quotidiennes, découlant principalement de soucis neurologiques.

Il est également constaté qu'en cas de "fume event" les équipages sont beaucoup plus affectés que les passagers, suggérant une hypothèse de saturation de l'organisme.

La CFDT et le SPL s'inquiètent pour l'état de santé des équipages, des passagers, et pour la sécurité des vols.

Les rapports de l'OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale), et le récent Safety Alert for Operators (SAFO) diffusé par l'organisme américain FAA (Federal Aviation Administration) (en annexes) confirment les inquiétudes.

C'est pourquoi, pour compléter ces études, nous vous demandons d'apporter votre expertise scientifique sur :

- **L'effet d'une contamination chronique par les composés chimiques présents dans l'air cabine lors d'un fonctionnement "normal" (bioaccumulation)**
- **L'effet d'une contamination aigue, lors de "fume event"**

Sur la santé des équipages et passagers, en tenant compte :

- De "l'effet cocktail"
- Que des enfants, des femmes enceintes, des personnes âgées... sont à bord
- Des effets des nanoparticules issues de la pyrolyse d'huile sur les cellules vivantes

Nous sollicitons votre expertise pour :

- Trouver des marqueurs biologiques
- Définir une méthode d'analyse scientifique simple, accessible et fiable pour le suivi médical
- Définir des conseils sanitaires en cas d'expositions chroniques ou aiguës
- D'apporter des seuils pour la santé à la fois en cas d'expositions chroniques et aiguës. (En tenant compte également la contamination possible de fœtus, d'enfants, de personnes âgées, ou avec une santé dégradée...)
- De suggérer des méthodes de soins ou de décontamination
- De déterminer un profil de personnes les plus à risque (génotype, âge...)

Conscients de l'ampleur de nos attentes, nous restons à votre disposition pour vos sollicitations ou requêtes sur le sujet.

Nous vous prions, Monsieur le Directeur Général, de recevoir nos salutations distinguées.

Edwina Lamoureux - CFDT
Membre du conseil d'administration



Annexe 2. Grille AMSTAR 2

	Date de lecture		
	Auteur(s)		
	Date		
	Référence complète		
	pmid		
	Type de revue (<i>Revue systématique, méta-analyse ou les deux.</i>)		
	Objectifs		
	Infos méthodo?		
évaluation qualité	critères AMSTAR 2	Réponse : voir menu déroulant de la cellule	Commentaires
	1 - Est-ce que les questions de recherche et les critères d'inclusion de la revue ont inclus les critères PICO ?		
	Tous les critères (population, intervention, comparateur, outcome)		
	durée de suivi (optionnel) (Timeframe for follow-up)		
	score	0	
	2 - Est-ce que le rapport de la revue contenait une déclaration explicite indiquant que la méthode de la revue a été établie avant de conduire la revue ? Est-ce que le rapport justifiait toute déviation significative par rapport au protocole ?		
<p>"Oui partiel" si tous les critères sont remplis</p> <p>Le protocole devrait être enregistré et devrait également spécifier :</p> <ul style="list-style-type: none"> - question(s) de la revue - stratégie de la recherche - critères d'inclusion et d'exclusion - une évaluation du risque de biais <p>"Oui" si tous les critères de la question précédente sont remplis + tous les critères ci-après</p> <p>Les auteurs déclarent qu'ils avaient un protocole écrit ou un guide qui comprenait TOUS les éléments suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> - un plan de méta-analyse/synthèse, le cas échéant, et 			

	<ul style="list-style-type: none"> - un plan de recherche des causes d'hétérogénéité - la justification de toute déviation du protocole 		
score		0	
3 - Les auteurs ont-ils expliqué leur choix de schémas d'étude à inclure dans la revue ?			
	<p>"Oui" si un des critères suivants est rempli</p> <p>Le protocole devrait être enregistré et devrait également spécifier :</p> <ul style="list-style-type: none"> - une justification pour l'inclusion uniquement des essais randomisés contrôlés (RCT) - Ou une justification pour l'inclusion uniquement des essais non randomisés (NRSI) - Ou une justification pour l'inclusion des essais randomisés et non randomisés 		
score		0	
4 - Les auteurs ont-ils utilisé une stratégie de recherche documentaire exhaustive ?(ancienne question 2)			

	<p>"Oui partiel" si tous les critères sont remplis</p> <ul style="list-style-type: none"> - Au moins deux bases de données (en lien avec la question posée) ont été utilisées - les mots clés et/ou la stratégie de recherche sont indiqués - Les restrictions (ex langue) sur les publications sont justifiées <p>"Oui" si tous les critères de la question précédente sont remplis + tous les critères ci-après</p> <ul style="list-style-type: none"> - Recherche dans les listes de références / bibliographies des études incluses - recherche dans les registres d'essais/études - inclus/consulté des études d'experts reconnus sur la question - le cas échéant, consultation de la littérature grise - conduit les recherches dans les 24 mois de la réalisation de la revue (conducted search within 24 months of completion of the review) 		
score		0	
5 - Les auteurs ont-ils effectué en double la sélection des études ? (ancienne question 2)			
	<p>"Oui" si un des critères suivants est rempli</p> <ul style="list-style-type: none"> - au moins 2 auteurs se sont accordés de manière indépendante sur la sélection des études éligibles et sont parvenus à un consensus sur les études à inclure - OU 2 auteurs ont sélectionné un échantillon d'études éligibles <u>et</u> sont parvenus à un bon accord (au moins 80 %), le reste étant sélectionné par un seul auteur 		
score		0	
6 - Les auteurs ont-ils effectuée en double l'extraction des données ? (ancienne question 2)			

<p>"Oui" si un des critères suivants est rempli</p> <ul style="list-style-type: none"> - au moins 2 auteurs se sont accordés sur les données à extraire des études incluses - OU 2 auteurs ont sélectionné des données sur un échantillon d'études éligibles <u>et</u> sont parvenus à un bon accord (au moins 80 %), le reste des données étant sélectionné par un seul auteur 		
score 0		
7 - Les auteurs ont-ils fourni une liste des études exclues et justifié les exclusions ? (anciennes questions 5B et 5C)		
<p>"Oui partiel" si les auteurs ont:</p> <ul style="list-style-type: none"> - donné une liste de toutes les études potentiellement pertinentes qui ont été lues en texte intégral mais exclues de la revue <p>"Oui" si le critère de la question précédente est rempli et que les auteurs ont:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Justifié l'exclusion de la revue de chaque étude potentiellement pertinente 		
score 0		
8 - Les auteurs ont-ils décrit les études incluses de manière suffisamment détaillée ? (ancienne question 6)		
<p>Oui partiel si tous les critères sont remplis</p> <ul style="list-style-type: none"> - descriptions des populations, interventions, comparateurs et outcomes - description du protocole de recherche (research designs) <p>Oui si tous les critères de la question précédente sont remplis + tous les critères ci-après</p> <ul style="list-style-type: none"> - description en détail de la population, de l'intervention (avec les doses le cas échéant), le comparateur (avec les doses le cas échéant) - description des paramètres de l'étude (study's setting) - le délai de suivi (timeframe for follow-up) 		
score 0		

9 - Les auteurs ont-ils utilisé une technique satisfaisante pour évaluer le risque de biais des études individuelles incluses dans la revue ?		
<p>RCTs</p> <p>"Oui partiel" si les risques de biais de tous les points suivants sont évalués :</p> <ul style="list-style-type: none"> - non dissimulation de l'allocation (unconcealed allocation), et - l'absence d'essais en double aveugle lors de l'évaluation des outcomes (non nécessaire pour les outcomes objectifs tels que la mortalité toutes causes confondues) <p>"Oui" si les risques de biais de tous les points précédents et les suivants sont évalués :</p> <ul style="list-style-type: none"> - séquence d'allocation qui n'était pas réellement aléatoire, et - la sélection du résultat rapporté à partir de multiples mesures ou analyses de l'outcome spécifié 		
<p>NRSI</p> <p>"Oui partiel" si les risques de biais de tous les points suivants sont évalués :</p> <ul style="list-style-type: none"> - facteurs de confusion - biais de sélection <p>"Oui" si les risques de biais de tous les points précédents et les suivants sont évalués :</p> <ul style="list-style-type: none"> - méthodes utilisées pour déterminer les exposition set les outcomes, et - la sélection du résultat rapporté à partir de multiples mesures ou analyses de l'outcome spécifié 		
score 0		
10 - Les auteurs ont-ils indiqué les sources de financement des études incluses dans la revue ?		

	<p>"Oui" si un des critères suivants est rempli :</p> <ul style="list-style-type: none"> - la revue fait état des sources de financement des études individuelles incluses dans la revue, OU - s'il est mentionné que les auteurs ont recherché cette information mais qu'elle n'a pas été rapportée par les auteurs de l'étude 		
score		0	
11 - Si une méta-analyse a été effectuée, les auteurs ont-ils utilisé des méthodes appropriées pour la combinaison statistique des résultats ?			
	<p>RCTs</p> <p>"Oui" si</p> <p>Les auteurs ont justifié la combinaison des données dans une méta-analyse :</p> <ul style="list-style-type: none"> - ET ils ont utilisé une technique de pondération appropriée pour combiner les résultats des études et ajusté l'hétérogénéité si elle était présente. - ET ils ont étudié les causes de toute hétérogénéité. 		
	<p>NRSI</p> <p>"Oui" si</p> <p>Les auteurs ont justifié la combinaison des données dans une méta-analyse :</p> <ul style="list-style-type: none"> - ET ils ont utilisé une technique de pondération appropriée pour combiner les résultats des études et ajusté l'hétérogénéité si elle était présente. - ET ils ont combiné statistiquement les estimations d'effets des NRSI qui ont été ajustées pour tenir compte des facteurs de confusion, plutôt que de combiner les données brutes, ou ont justifié la combinaison des données brutes lorsque les estimations d'effet ajustées n'étaient pas disponibles - ET ils ont rapporté des estimations sommaires séparées pour les RCTs et les NRSI lorsque les deux étaient inclus dans l'étude. 		
score		0	

12 - Si une méta-analyse a été effectuée, les auteurs ont-ils évalué l'impact potentiel des risques de biais des études individuelles sur les résultats de la méta-analyse ou d'une autre synthèse des preuves ?		
<p>"Oui" si</p> <ul style="list-style-type: none"> - n'incluait que des RCTs à faible risque de biais - OU, si l'estimation groupée était basée sur des RCTs et/ou des NRSI à des risques de biais variables, les auteurs ont effectué des analyses pour étudier l'impact possible des risques de biais sur les estimations sommaires de l'effet. 		
score		0
13 - Les auteurs ont-ils pris en compte le risque de biais des études individuelles lors de l'interprétation / de la discussion des résultats de la revue ?		
<p>"Oui" si</p> <ul style="list-style-type: none"> - n'incluait que des RCTs à faible risque de biais - OU, la revue a fourni une discussion sur l'impact probable du risque biais sur les résultats, si elle incluait des RCT avec un risque de biais modéré ou élevé, ou des NRSI. 		
score		0
14 - Les auteurs ont-ils fourni une explication satisfaisante pour toute hétérogénéité observée dans les résultats de la revue, et une discussion sur celle-ci ? (ancienne question 9C)		
<p>"Oui" si</p> <ul style="list-style-type: none"> - Il n'y avait pas d'hétérogénéité significative dans les résultats. - OU s'il y avait une hétérogénéité, les auteurs ont effectué une recherche des sources de toute hétérogénéité dans les résultats et ont discuté de l'impact de celle-ci sur les résultats de la revue 		
score		0
15 - S'ils ont réalisé une synthèse quantitative, les auteurs ont-ils mené une évaluation adéquate des biais de publication (biais de petite étude) et ont discuté de son impact probable sur les résultats de la revue ? (Ancienne question 10 mais uniquement sur méta-analyse)		

	<p>"Oui" si</p> <ul style="list-style-type: none"> - les auteurs ont effectué des tests graphiques ou statistiques pour les biais de publication et ont discuté de la probabilité et de l'ampleur de l'impact du biais de publication. 			
	score	0		
	16 - Les auteurs ont-ils rapporté toute source potentielle de conflit d'intérêts, y compris tout financement reçu pour réaliser la revue ? (ancienne question 11)			
	<p>"Oui" si</p> <ul style="list-style-type: none"> - Les auteurs n'ont signalé aucun intérêt concurrent OU - Les auteurs ont décrit leurs sources de financement et la manière dont ils ont géré les conflits d'intérêts potentiels 		préciser les liens si "oui"	
	score	0		
	classification	critically low		
Résultats	type de données			
	Population (si données épidémi)			
	Espèces/souches/lignées cellulaires (si données tox)			
	Exposition	<i>forme</i>		
		<i>source / fracturation</i>		
		<i>granulométrie</i>		
		<i>concentration/durée</i>		
	<i>mesures?</i>			
	Comparateur			
	Outcome			
	Description des résultats	<p><i>Que ressort-il de l'analyse?</i> <i>Comment les résultats sont-ils présentés?</i> <i>Quelles sont les tendances qui se dégagent?</i></p>		
Quels sont les biais qui ont pu influencer l'analyse?				
liens d'intérêts				
Conclusions des auteurs				
Commentaires du lecteur				

avis du lecteur (étude retenue / non retenue)	<i>développer si étude retenue, alors que serait non retenue par cotation R-Amstar</i>
--	--

Grille Amstar-2 modifiée pour les revues de synthèse relatives à la qualité de l'air

Identification	Nom du lecteur		
	Date de lecture		
	Auteur(s)		
	Date		
	Référence complète		
	pmid		
	Type de revue (<i>Revue systématique, méta-analyse ou les deux.</i>)		
	Objectifs		
	Infos méthodo?		
évaluation qualité	critères AMSTAR 2	Réponse : voir menu déroulant de la cellule	Commentaires
	1 - Est-ce que les questions de recherche et les critères d'inclusion de la revue ont inclus les critères PECO ?		
	Tous les critères (population, Exposition , comparateur, outcome)		
	durée de suivi (optionnel) (Timeframe for follow-up)		
	score	0	
	2 - Est-ce que le rapport de la revue contenait une déclaration explicite indiquant que la méthode de la revue a été établie avant de conduire la revue ? Est-ce que le rapport justifiait toute déviation significative par rapport au protocole ?		
	<p>"Oui partiel" si tous les critères sont remplis Le protocole devrait être enregistré et devrait également spécifier :</p> <ul style="list-style-type: none"> - question(s) de la revue - stratégie de la recherche - critères d'inclusion et d'exclusion - une évaluation du risque de biais <p>"Oui" si tous les critères de la question précédente sont remplis + tous les critères ci-après Les auteurs déclarent qu'ils avaient un protocole écrit ou un guide qui comprenait TOUS les éléments suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> - un plan de méta-analyse/synthèse, le cas échéant, et - un plan de recherche des causes d'hétérogénéité - la justification de toute déviation du protocole 		
score	0		
3 - Les auteurs ont-ils expliqué leur choix de schémas d'étude à inclure dans la revue ? <i>(exemple : études terrain, vols conditions normales, vols avec incidents, modélisation, simulation, etc.)</i>			

<p>"Oui" si un des critères suivants est rempli Le protocole devrait être enregistré et devrait également spécifier :</p> <ul style="list-style-type: none"> - <u>une justification pour l'inclusion uniquement d'études en conditions de vols normales</u> - <u>Ou une justification pour l'inclusion uniquement d'études en conditions avec incidents</u> - <u>Ou une justification pour autre raison</u> 		
score		0
4 - Les auteurs ont-ils utilisé une stratégie de recherche documentaire exhaustive ?		
<p>"Oui partiel" si tous les critères sont remplis - Au moins deux bases de données (en lien avec la question posée) ont été utilisées - les mots clés et/ou la stratégie de recherche sont indiqués - Les restrictions (ex langue) sur les publications sont justifiées</p> <p>"Oui" si tous les critères de la question précédente sont remplis + tous les critères ci-après - Recherche dans les listes de références / bibliographies des études incluses - recherche dans les registres d'essais/études - inclus/consulté des études d'experts reconnus sur la question - le cas échéant, consultation de la littérature grise - conduit les recherches dans les 24 mois de la réalisation de la revue (conducted search within 24 months of completion of the review)</p>		
score		0
5 - Les auteurs ont-ils effectué en double la sélection des études ?		
<p>"Oui" si un des critères suivants est rempli - au moins 2 auteurs se sont accordés de manière indépendante sur la sélection des études éligibles et sont parvenus à un consensus sur les études à inclure - OU 2 auteurs ont sélectionné un échantillon d'études éligibles <u>et</u> sont parvenus à un bon accord (au moins 80 %), le reste étant sélectionné par un seul auteur</p>		
score		0
6 - Les auteurs ont-ils effectuée en double l'extraction des données ?		
<p>"Oui" si un des critères suivants est rempli - au moins 2 auteurs se sont accordés sur les données à extraire des études incluses - OU 2 auteurs ont sélectionné des données sur un échantillon d'études éligibles <u>et</u> sont parvenus à un bon accord (au moins 80 %), le reste des données étant sélectionné par un seul auteur</p>		
score		0
7 - Les auteurs ont-ils fourni une liste des études exclues et justifié les exclusions ?		

<p>"Oui partiel" si les auteurs ont:</p> <ul style="list-style-type: none"> - donné une liste de toutes les études potentiellement pertinentes qui ont été lues en texte intégral mais exclues de la revue <p>"Oui" si le critère de la question précédente est rempli et que les auteurs ont:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Justifié l'exclusion de la revue de chaque étude potentiellement pertinente 		
score	0	
8 - Les auteurs ont-ils décrit les études incluses de manière suffisamment détaillée ?		
<p>Oui partiel si tous les critères sont remplis</p> <ul style="list-style-type: none"> - descriptions des populations, interventions, comparateurs et outcomes - description du protocole de recherche (research designs) <p>Oui si tous les critères de la question précédente sont remplis + tous les critères ci-après</p> <ul style="list-style-type: none"> - description en détail de la population, de l'intervention (avec les doses le cas échéant), le comparateur (avec les doses le cas échéant) - description des paramètres de l'étude (study's setting) - le délai de suivi (timeframe for follow-up) 		
score	0	
9 - Les auteurs ont-ils utilisé une technique satisfaisante pour évaluer le risque de biais des études individuelles incluses dans la revue ?		
Mesures conditions de vols normales ? <u>Oui ou Non</u>		
Mesures conditions de vols avec incidents ? <u>Oui ou Non</u>		
score	0	
10 - Les auteurs ont-ils indiqué les sources de financement des études incluses dans la revue ?		
<p>"Oui" si un des critères suivants est rempli :</p> <ul style="list-style-type: none"> - la revue fait état des sources de financement des études individuelles incluses dans la revue, OU - s'il est mentionné que les auteurs ont recherché cette information mais qu'elle n'a pas été rapportée par les auteurs de l'étude 		
score	0	
11 - Si une méta-analyse a été effectuée, les auteurs ont-ils utilisé des méthodes appropriées pour la combinaison statistique des résultats ?		
Mesures conditions de vols normales ? "Oui" si Les auteurs ont justifié la combinaison des données dans une méta-analyse : - ET ils ont utilisé une technique de pondération appropriée pour combiner les résultats des études et ajusté l'hétérogénéité si elle était présente. - ET ils ont étudié les causes de toute hétérogénéité.		
Mesures conditions de vols avec incidents ? "Oui" si Les auteurs ont justifié la combinaison des données dans une méta-analyse : - ET ils ont utilisé une technique de pondération		

appropriée pour combiner les résultats des études et ajusté l'hétérogénéité si elle était présente.		
score	1	
12 - Si une méta-analyse a été effectuée, les auteurs ont-ils évalué l'impact potentiel des risques de biais des études individuelles sur les résultats de la méta-analyse ou d'une autre synthèse des preuves ?		
"Oui" si - n'inclut que des <u>études</u> à faible risque de biais - OU, si l'estimation groupée était basée sur <u>des études</u> à des risques de biais variables, les auteurs ont effectué des analyses pour étudier l'impact possible des risques de biais sur les <u>données de concentration et expositions</u>		
score	0	
13 - Les auteurs ont-ils pris en compte le risque de biais des études individuelles lors de l'interprétation / de la discussion des résultats de la revue ?		
"Oui" si - n'inclut que des <u>études</u> à faible risque de biais - OU, la revue a fourni une discussion sur l'impact probable du risque de biais sur les résultats, si elle incluait des <u>études</u> avec un risque de biais modéré ou élevé.		
score	0	
14 - Les auteurs ont-ils fourni une explication satisfaisante pour toute hétérogénéité observée dans les résultats de la revue, et une discussion sur celle-ci ?		
"Oui" si - Il n'y avait pas d'hétérogénéité significative dans les résultats. - OU s'il y avait une hétérogénéité, les auteurs ont effectué une recherche des sources de toute hétérogénéité dans les résultats et ont discuté de l'impact de celle-ci sur les résultats de la revue		
score	0	
15 - S'ils ont réalisé une synthèse quantitative, les auteurs ont-ils mené une évaluation adéquate des biais de publication (biais de petite étude) et ont discuté de son impact probable sur les résultats de la revue ?		
"Oui" si - les auteurs ont effectué des tests graphiques ou statistiques pour les biais de publication et ont discuté de la probabilité et de l'ampleur de l'impact du biais de publication.		
score	0	
16 - Les auteurs ont-ils rapporté toute source potentielle de conflit d'intérêts, y compris tout financement reçu pour réaliser la revue ? (ancienne question 11)		
"Oui" si - Les auteurs n'ont signalé aucun intérêt concurrent OU - Les auteurs ont décrit leurs sources de financement et la manière dont ils ont géré les conflits d'intérêts potentiels		
score	0	
classification		

Cotation

16 questions dont 7 critiques. Pour chaque question, 1 point

Classification :

- critically low : somme des paramètres critiques < 6 \Leftrightarrow au moins 2 réponses "non" aux paramètres critiques
- low : somme des critères critiques < 7 \Leftrightarrow 1 seule réponse "non" aux paramètres critiques
- moderate : somme des paramètres critiques = 7 et somme des autres paramètres < 8 \Leftrightarrow toutes réponses oui aux paramètres critiques + au moins 2 réponses non aux autres paramètres
- high : somme des paramètres critiques = 7 et somme des autres paramètres ≥ 8 \Leftrightarrow toutes réponses oui aux paramètres critiques + au plus 1 réponses non aux autres paramètres

Annexe 3. Grille de lecture des articles princeps

Logistique	Nom du relecteur	
	Date de lecture	
	Saisine associée	
Article	Auteurs	<i>Tous éléments permettant l'identification de l'étude afin de pouvoir s'y référer au besoin et de pouvoir la citer</i>
	Date	
	Titre de l'étude	
	Journal	
	Objectif de l'étude	<i>Contexte, objectif de l'étude et/ou hypothèses testées</i>
design de l'étude	Type d'étude	<i>double aveugle, randomisation, groupe contrôle ?</i>
	Description de la population ou des groupes	<i>Effectif, caractéristiques sociodémographique des sujets (âge, sexe ratio, etc.)</i>
		<i>type de population (personnels navigant, passagers, etc.)</i>
		<i>lieu de réalisation (multicentrique, pays)</i>
		<i>Critères inclusion/exclusion</i>
		<i>Mode de recrutement : volontariat, registres...</i>
	Exposition	<i>Caractérisation de l'agent d'exposition : définition (nom, n°CAS, etc.), type d'indicateur (biomarqueur, métabolite ...)</i>
		<i>Voie d'exposition (respiratoire, cutanée, orale...)</i>
		<i>Doses/concentration/niveau d'exposition valeurs nominales ou mesurées ? Méthode de mesure ?</i>
		<i>Fréquence et durée d'exposition</i>
Effet(s) sanitaire(s) étudié(s)	<i>Définition de l'/les effet(s) sanitaire(s) étudié(s)</i>	
	<i>Description de la mesure de l'effet sanitaire/mode de recueil de l'effet sanitaire</i>	
	<i>examens à l'inclusion, lors de l'essai</i>	
	<i>durée du suivi</i>	
Analyse statistique	Méthode d'analyse statistique	<i>Type de test, uni ou bilatéral, type de modèle (linéaire, logistique, Cox, etc.)</i>
	Ajustement	<i>oui/non sur quelles variables ?</i>
	Puissance	<i>Calcul a posteriori de la puissance</i>
	Autres éléments de discussion	<i>variabilité de l'exposition dans la population source, surappariement ou surajustement...</i>
Résultats	Résultats / Force de l'association observée	<i>Résultats</i>
Discussion	Biais	<i>Mention de biais de sélection, de classement ...</i>
		<i>Biais de confusion : mention, méthodes de prise en compte des facteurs</i>

	Discussion et conclusion des auteurs	
	Commentaire Relecteur(s)	<i>Pertinence du protocole d'exposition / discussion des incertitudes liées aux mesures d'exposition</i>
	Références bibliographiques à récupérer	<i>résultats, prise en compte des facteurs de confusion, etc.</i>
	Sources de Financement / lien d'intérêt potentiel	
Conclusion	Incertitude/Niveau de preuve	<i>Critère qualité méthodologique. A déterminer selon les groupes de travail (bonne qualité, limites méthodologiques non majeures, limites méthodologiques majeures)</i>
		<i>Réponse à la question posée de la saisine</i>
	Etude à retenir pour l'expertise	oui/non

Grille de lecture – Métrologie / exposition- Qualité de l'air en cabine

Relecteur	Nom du relecteur	
	Date de lecture	
	Saisine associée	
Article	Identification sous Ryvan : Auteur /date	
	Objectifs de l'étude	
	Agent(s) mesuré(s)/considéré(s) (<i>substance chimique, agent physique, microbiologique, etc.</i>)	
Stratégie mise en œuvre pour les mesures	Stratégie d'échantillonnage	
Prélèvements / mesures	Population d'étude : (<i>personnel naviguant présent en cabine, autre professionnel, ou plus large</i>)	
	Date des essais/mesures décrits	
	Lieu(x) de prélèvement (<i>Préciser si avion militaire, civil, cabine, cockpit, bouches aération, aéroport (pour étude cabine + aéroport), etc.</i>)	
	Méthodes et conditions de prélèvement	
	Critères de conservation et de transport	
Analyse	Date d'analyse (1) + Délai entre analyse et prélèvement (2)	
	Préparation échantillon	
	Technique d'analyse	
	Sensibilité/Performance analytique	

Sources	Sources de contamination identifiées ou supposées	
Résultats	Concentrations mesurées et conditions associées	
Discussion	Discussion et conclusion Auteurs	
	Commentaires relecteur(s)	
	Références bibliographiques pertinentes à récupérer <i>(si la publication fait référence à une autre publication d'intérêt, ou si le détail des mesures est publié dans un autre papier)</i>	
	Sources de financement / Voire filiation des auteurs (Liens d'intérêts potentiels)	
Conclusion du relecteur	Avis du relecteur sur le détail des résultats et la qualité méthodologique (stratégie, mesures, etc.)	
	Identification des biais	
	Etude à retenir pour l'expertise Oui/non Si non : critères d'exclusion à préciser	

Annexe 4. Recherche de la littérature grise

Acronyme de l'organisme	Organisme	Site internet	Mots clé
A4A	<i>Airline for america</i>	https://www.airlines.org/	cabin ar quality, health , fume event , smoke event , aerotoxic
ACRP	<i>Airport Cooperative Research Program</i>	https://www.trb.org/ACRP/ACRP.aspx	cabin ar quality, health , fume event , smoke event , aerotoxic
ASHRAE	<i>American Society of Heating and Air-Conditioning Engineers</i>	https://www.ashrae.org/	airplane
ASHS	<i>Air safety, health & security</i>	https://www.air-safety-security.com/	cabin ar quality, health , fume event , smoke event , aerotoxic
ASMA	<i>Aerospace medical association</i>	https://www.asma.org/home	aerotoxic ;fume event ; smoke event ; health ; air quality
AVSA	Association des victimes du syndrome aérotoxique	https://www.syndrome-aerotoxique.com/	Pas de moteur de recherche, consultation du site dans son ensemble
BEA	Bureau d'enquêtes et d'analyses pour la sécurité de l'aviation civile	https://bea.aero/	recherche dans les enquêtes de sécurité : fume event ; smoke event ; fumée ; aerotoxique ; qualité de l'air ; air cabine :
BFU	<i>Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung</i>	https://www.bfu-web.de/EN/AboutUs/aboutus_node.html	aerotoxic ; fume event ; smoke event ; air quality ; health
CAA	<i>Civil Aviation Authority</i>	https://www.caa.co.uk/	aerotoxic , fume event ; smoke event ; cabin air quality
CASA	<i>Civil Aviation Safety Authority</i>	https://www.casa.gov.au/	aerotoxic , fume event ; smoke event ; cabin air quality
CETIAT	Centre Technique des Industries Aéronautiques et Thermiques	https://www.cetiat.fr/	aerotoxic ; fume event ; smoke event ; avion
CIRC	Centre international de recherche sur le cancer	https://www.iarc.who.int/fr/	aerotoxic ; aircrew ; flight attendant ; airplane ; aircraft ;
DGAC	Direction generale de l'aviation civile	https://www.ecologie.gouv.fr/direction-generale-laviation-civile-dgac	aerotoxique ; fume event ; smoke event ; qualité de l'air ;

Acronyme de l'organisme	Organisme	Site internet	Mots clé
EASA	Agence européenne de la sécurité aérienne	https://www.easa.europa.eu/en	aerotoxic ; fume event ; smoke event ; cabin air quality ; aircrew health
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>	https://www.epa.gov/	aerotoxic ; cabin air quality ; aircrew health ; fume event ; smoke event
ESAM	<i>European Society of Aerospace Medicine</i>	https://www.esam.aero/	aerotoxic ; health ; fume event ; smoke event ; air quality
EU OSHA	Agence européenne pour la sécurité et la santé au travail	https://osha.europa.eu/fr	aerotoxic ; airplane ; fume event ; aircrew
FAA	<i>Federal aviation administration</i>	https://www.faa.gov/	aerotoxic ; fume event ; cabin air quality ; aircrew health
GCAQE	<i>Global Cabin Air Quality Executive</i>	https://www.gcaqe.org/	Pas de moteur de recherche, consultation du site dans son ensemble
IATA	Association du transport aérien international	https://www.iata.org/	aerotoxic ; fume event ; smoke event ; air quality ; aircrew
INRS	Institut national de recherche et de sécurité	https://www.inrs.fr/	aerotoxic ; aerotoxique ; avion ; pilote ; personnel navigant ; fume event ; smoke event ; qualité air avion
IRSST	Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail	https://www.irsst.qc.ca/	aérototoxique ; aerotoxic ; fume event ; avion ; personnel navigant
NiOSH	<i>National Institute for Occupational Safety and Health</i>	https://www.cdc.gov/niosh/index.htm	aerotoxic ; fume event(s) ; smoke event(s) ; aircrew ; flight attendant (aircraft) ; cabin air quality
NRC	<i>National research council</i>	https://www.nationalacademies.org/home	aerotoxix ; airplane ; aircrew ; fume event ; flight attendant
OACI	Organisation de l'aviation civile internationale	https://www.icao.int/Pages/default.aspx	aerotoxic ; cabin air quality ; aircrew health ; fume event ; smoke event
OHCRA	<i>Occupational health research consortium in aviation</i>	https://www.ohrca.org/	aerotoxic ; fume event ; aircrew ; cabin air quality
OSHA	<i>Occupational Safety and Health Administration</i>	https://www.osha.gov/	aerotoxic ; aicrew ; airplane
RIVM	<i>National Institute for Public Health and the Environment</i>	https://www.rivm.nl/en	aerotoxic ; fume event ; aircrew ; airplane ; flight attendant ; airplane
SOFRAMAS	société francophone de médecine aérospatiale	https://www.soframas.asso.fr/	aerotoxique ; fume event ; smoke event ; qualité air ; santé ; pollution

Acronyme de l'organisme	Organisme	Site internet	Mots clé
SPF	Santé publique France	https://www.santepubliquefrance.fr/	aerotoxique ; aerotoxic ; fume event ; avion ; personnel navigant
TNO	<i>Netherlands Organisation for Applied Scientific Research</i>	https://www.tno.nl/en/	aerotoxic ; aircrew ; fume event ; smoke event ; air quality
Unisanté	Centre universitaire de médecine générale et santé publique à Lausanne.	https://www.unisante.ch/fr	aérottoxique ; aerotoxic ; fume event ; personnel navigant ; avion

Annexe 5. Comptes rendus des auditions

Les propos tenus lors des différentes auditions et retracés dans les comptes rendus qui suivent relèvent de la seule responsabilité de leurs auteurs et ne sauraient être perçus comme validés ou partagés par l'Anses.

Anses working group

Minutes of the hearing of Pr Scholz on the operation of air conditioning in aircraft cabins and the associated air quality

July 8th, 2021

The aim of this hearing is to gather some information on:

- How ventilation/air conditioning/filtration works in aircraft
- The regulation of ventilation/air conditioning/filtration
- The incidents from the air system in aircraft called "fume events"
- The factors influencing the chemical contamination of the cabins according to the phases and operating modes of flights
- The perspectives with the solutions which might be under study or testing

Prior to this hearing, a document presenting the French Agency ANSES, the objectives of the current work of expertise on air quality in aircraft and the objectives of this hearing was sent to Professor Scholz.

Dieter Scholz is a professor in aircraft design, flight mechanics, and aircraft systems at Hamburg University of Applied Sciences (HAW Hamburg), Germany, Department of Automotive and Aeronautical Engineering, where he is head of the Aircraft Design and Systems Group (AERO).

Henri Bastos, deputy head of the risk assessment department and scientific director of occupational health, began the hearing by introducing Professor Scholz, before initiating a round table presentation of the participants. Then the floor is left to Pr Scholz for 30 minutes presentation followed by an exchange with the experts of the working group.

Presentation

- **Definitions**

Fume Event

In a fume event, the cabin and/or cockpit of an aircraft is filled with fume. Air contamination is due to fluids such as engine oil, hydraulic fluid or anti-icing fluid. A Fume Event includes a Smell Event. Note: Other reasons for fume in the cabin are possible. The term "fume event", however, is generally used as defined here. Definition adapted from (Wikipedia 2019)

Smell Event

A fume event without visible fume or smoke, but with a distinct smell usually described as "dirty socks" from the butyric acid originating from a decomposition of the esters that are the base stock of the synthetic jet engine oil.

Cabin Air Contamination Event (CACE)

In a Cabin Air Contamination Event (CACE) the air in the cabin and/or cockpit of an aircraft is contaminated. Sensation of the contamination can be from vision (fume/smoke), olfaction (smell/odor), a combination of typical symptoms experienced by several passengers and/or crew or by related measurements of CO, CO₂, ozon or other "harmful or hazardous concentrations of gases or vapours" (CS-25.831).

- **Introduction**

Some example of fume events are described: after a fire warning and fume in the cabin, the plane landed. Since, no sign of fire could be observed, it was concluded that it was the failure of seals in the engine. This happened at the altitude corresponding to the top of descent "TOD", when the thrust levers pulled back which gives not sufficient pressure in the compressor and it's the point where oil can leak. This does not happen on every flight, but when it is combined with a failure of the labyrinth seals.

- **Cabin air contaminated events (CACE)**

There are two kinds of CACE, primary and secondary. Primary when the event is in the engine and secondary when the event is linked to the depot in the ducts, but it is not fully understood yet how secondary contaminations can occur.

Concerning the frequency, there is no scientific consolidated data. The number of 5 events in 100 000 flights is presented, but other numbers are reported. It is difficult to establish this frequency because there is under-reporting. If only 10 % of the events got reported, then it might be 1 flight out of 2 000 that could be affected with fume.

- **Detection of oil in the cabin**

- Oil traces in bleed air ducts,
- Oil traces in air conditioning ducts,
- Oil traces in recirculation filters,
- Oils traces on cabin surfaces,

Professor Scholz proposed a calculation method for aromatic hydrocarbons concentrations in the cabin, in case of oil leaks, that can be agreed with measurement. But to achieve the calculation, we need to know how much oil is leaking from the seals, which is not known yet. By assuming that 1 % of the oil consumption is due to leaks via the seals, a concentration of 17 µg.m⁻³ is calculated.

- Requirements (certification specifications (CS^{25s}) from EASA)




Air Conditioning System

Requirements

- Ventilation
 - "the ventilation system must be designed to provide a **sufficient amount** of uncontaminated air" "to provide each occupant with an airflow that contains at least **0.25 kg of fresh air** [outside air] **per minute**" CS-25.831(a) "i.e. 10 cubic feet per minute of air at 8000 feet pressure altitude and at a cabin temperature of 24 °C" AMC 25.831(a)(1)
 - "Where the air supply is supplemented by a **recirculating system**, it should be possible to stop the recirculating system and –
 - a. Still maintain the fresh air supply prescribed, and
 - b. Still achieve 1 [avoid contamination]." AMC 25.831(c)
 - "Each passenger and crew compartment must be ventilated ... to enable crewmembers to perform their duties **without undue discomfort or fatigue**." CS-25.831(a)
 - "Crew and passenger compartment air must be **free from harmful or hazardous concentrations of gases or vapours**." CS-25.831(b)
 - CO, CO₂, ozone concentration limits are given, but not for other substances. This does not mean that other substances are allowed in any concentration (BFU 2014) "The BFU is of the opinion that a product [aircraft] which has received a type certificate by EASA should be designed in a way that neither crew nor passengers are harmed or become chronically ill." (BFU 2014)






Air Conditioning System

Requirements

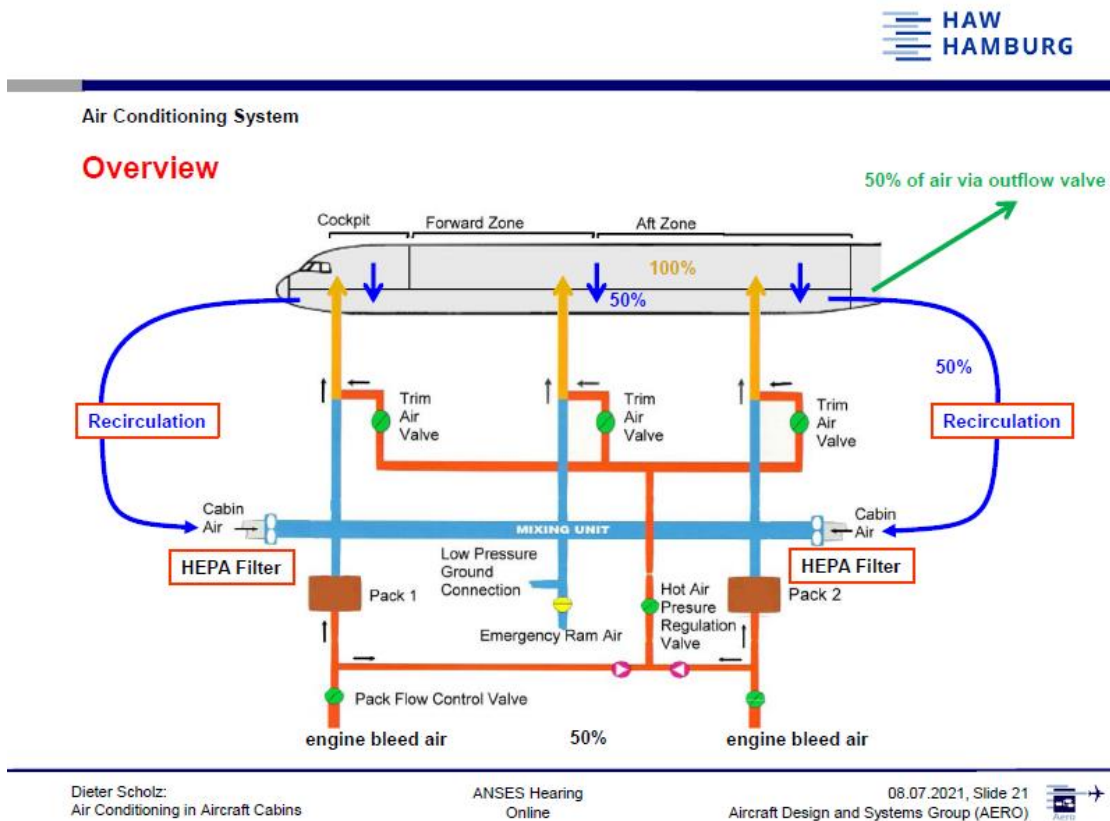
- **Temperature Control**
 - Cabin air temperatures are not defined in CS-25.
 - **Temperature control** is done by **ventilation** with (in most cases) cold air.
 - **Recirculation** allows to use "more air" at temperatures "not as cold" as required with less air.
 - Hence, **recirculation**
 - allows a more **even temperature distribution** in the cabin,
 - avoids cold drafts near passengers and **increases cabin comfort**.
 - "More air" (than required) could also be obtained from outside, but ...
 - **outside air needs** to be compressed (to cabin pressure), which requires **more energy**.
 - **recirculated air** only needs to be pumped (against pressure losses in tubes); it **saves energy**.
 - **Recirculated air** spreads air among all passengers (unlike outside air), hence **need of filtration**.
- **Pressure Control**
 "provide a cabin pressure altitude of not more than 8000 ft" CS-25.841(a)
- **Moisture Control**
 No requirements

Requirements related to pressure and moisture control are not further detailed.

Dieter Scholz:
Air Conditioning in Aircraft Cabins
ANSES Hearing
Online
08.07.2021, Slide 20
Aircraft Design and Systems Group (AERO)


- **Air conditioning system**

An overview of the air conditioning system based on engine bleed air is done.



The reason for using compressed air from the engine is because it's the cheapest way.

The air is taken from outside, where the conditions are, at cruise altitude :

- • 21% of oxygen content,
- • 22% of sea level pressure,
- • -56 °C

Therefore, the outside fresh air needs to be compressed because the pressure is low, by compression you get very high temperature, so you need to cool the air before it is injected in the cabin.

So the compressed air is taken from the engine, then it is being cooled into the so-called pack before going into the mixing unit. There are two packs for redundancy purposes. The air is heated up a little bit, particularly in the cockpit and the first, less in the economic class, where the seats are close to one another. Then the air goes into the cargo compartment half of the air is going outside and half is recirculated. Before returning to the mixing unit, the air is filtered by HEPA filters.

These filters are in place for health reason, to prevent contamination between passengers. HEPA filters do not filter VOC, but some HEPA filters can be paired with carbon filter to filter, odour/VOC. The incoming concentration of volatile organic compounds (VOC) can be reduced to 58,9% with a filtration rate of 0,7 and a recirculation rate of 0,5. To improve the air quality, filtration unit should be placed after the packs/before the mixing unit.

- **Jet engine technology**

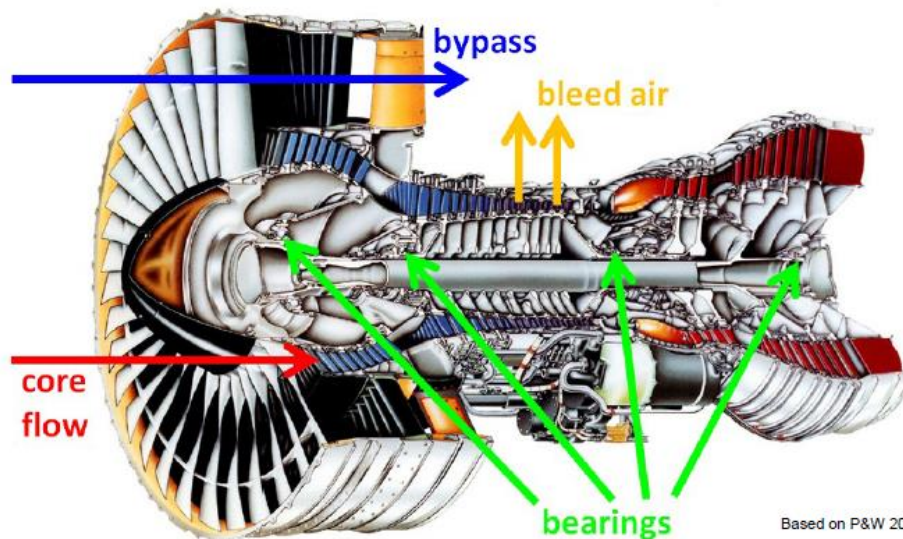
The air from the outside goes in the engine core, then it is compressed and at the end, the bleed air is taken.

In the bearing, the oil is supposed to stay in the wet cavity, but as it shown, in the scheme, oil can also be in the dry cavity, since a drain is foreseen. Engines leak small amounts of oil by design.



Jet Engine Technology

Engine Bearings and Bleed Air

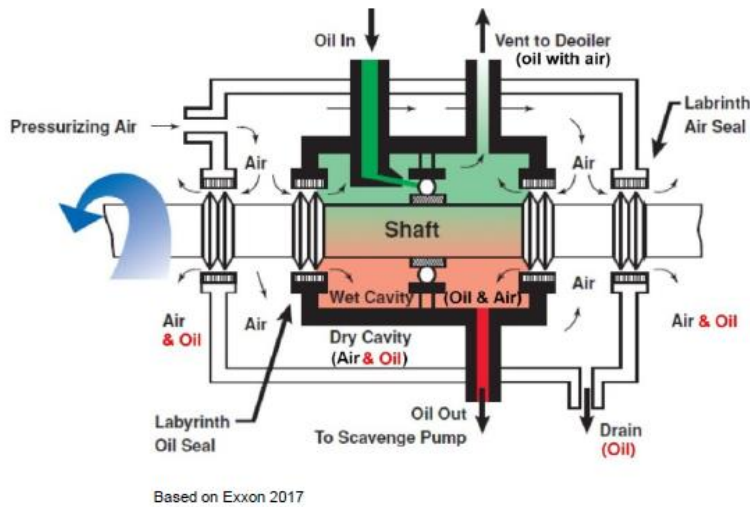


Based on P&W 2014



Jet Engine Technology

Lubrication and Sealing of Engine Bearings



Normal operation of engine seals:

1. The "drain" discharges oil.
2. The "dry cavity" contains oil.
3. Air and oil leak from bearings into the bleed air.

=> Engines leak small amounts of oil by design!



- **Metal particles**

Analysis of metal particles in oils identified micro and nano sizes, which can be present into the cabin. In the bearing, several metals are used, including iron, chromium and titanium. There is scientific analysis of the oil and so based on what metals and the size of the particles, it can be determined what are the wear stages of the engine. So having metal particles in the oil is totally normal, but it can go to the bleed air. It was found that these metal particles can be in the human fatty tissue of aviation employee, including chromium.

- **Other contaminants**

- Deicing fluids,
- Hydraulics fluids,
- Fuel,
- Other aircraft exhaust

The contaminants above can be found on the grounds and in the air of the airport and then enter into the cabins through the bleed air. Deicing fluid and hydraulic fluid leaking on the fuselage can also enter the cabin by the bleed air of the APU.

- **Potable water**

The bleed air is also used to pressurize the potable water, so the bleed air can contaminate the water. The last water extracted from the tank before it is empty is black, probably from engine oil residue.

- **Evidence of contamination of the ducts**

By observing detached parts of planes, collected in junk yards:

- Brown or black stains (probably from oil) in the bleed air duct vs clean fan air (coming from the engine bypass) duct. The colour depends of the

temperature in the duct.

- The inlet of the water extractor is covered with black oily residue
- The inside of air distribution duct in the cabin is black from contaminated bleed air vs "clean" duct which are not fed with bleed air
- Flow limiter clogged from pyrolysed oil in ducts of the air conditioning system,
- Black residues, which is not only dust, in top of overhead bins,
- Oily black soft substance covering the face of the recirculation fan

The access to aircraft junk yard, is rather difficult and expensive.

• Maintenance

During a period of 10 years (2004 to 2014) maintenance practice changed such that engines stay on the wing almost twice as long without shop visit and seal replacement and labyrinth-seal clearances naturally increase as engine ages.

In case of fume event, Airbus instructions is to manually clean the affected ducts using rags and appropriate degreasing agent. But, since aircraft are released back into service overnight after a CACE, it is not possible:

- Ducts cannot be removed from behind the panels in this short time,
- The inside of ducts is not accessible,
- Most of the deposit cannot be removed.

In conclusion, all these contaminants go in the cabin air, and then in the human body. It is not easy to measure these contaminants in the cabin air notably because the concentrations are low, but this does not mean they are not there. The accumulation on the floor, ducts... are evidences of the presence of substances in the air.

Concerning the EASA studies, it is important to know, that they are done in association with the aviation industry, so the interpretation of the measurement might be biased.

Question and answers

Are Metal nanoparticles always mixed with oil and what form is the chromium found in the oil? Are the nanoparticle detected in the air?

Pr. Scholtz confirm that there always are metallic nanoparticle in the oil. Research are made by Dr Gatti, in Italy, but are not published yet. Dr Gatti also made measurement on pilot clothes. Chromium is in metallic form. There are also other metals.

Nanoparticles were also found in fetus. In the 2017 EASA study, the contamination is confirmed, but it concluded that the concentrations are too low to go through the lung barrier of a healthy person. But are they only healthy persons on board, is it sure that the contaminant do not go through the lung barrier?

Concerning the picture of the human tissues with metallic nanoparticle, they could have come from somewhere else, like car's exhaust?

The point is valid. But this argument is also used when a pilot or a flight attendant shows medical evidence of a contamination: "How do we know that it is from the cabin air?" If several people at the same time in the same place are being affected and they're in an airplane with nanoparticles in the oil that can get into the cabin air, then it is likely that the contamination with nanoparticles came from the airplane.

It is surprising that there is no filter between the pack and the mixing unit. So adding a filter at this place would it be a solution? And why is it not implemented yet?

Yes, placing a filter between the pack and the mixing unit could be a solution. It is not done yet, because there is no industry consensus on the issue of the bleed air contamination. So, if there isn't a problem, why should a filter be added?

Is it possible to analyze the different residues?

Yes, it is possible to analyze the residues. There are publications on analyses of used HEPA filters.

In case of a fume event or CACE, how is it possible to differentiate primary and secondary CACE?

The slide was from the EASA study, and it was a hypothesis. The residues in the ducts could be released with the appropriate humidity and temperature. Ducts from a plane used for decades, were several kilograms heavier than new ones, because of the deposits. Nevertheless, it is not well understood, if it secondary CACEs have already caused a fume event.

The issue of fume event is known since the 1950's but with the smoke from the passengers on board, it was masked. With the ban on smoking in airplanes, the issue became more visible, and some people became concerned of the TCP in the oil, since TCP is known to be responsible of paralysis in 30 000 people in United States. The oil industry achieved to get rid of the TCP ortho isomers, but with the high temperature, other compounds are formed, so the issue is complicated. The issue is not only on TCPs, there are also the hydraulic fluids and deicing fluids, the nanoparticles...

So the solution could be to take the air from outside like the Dreamliner?

To use the air from outside, it needs to be compressed, if you do not use the engine, a compressor must be added, which also has bearings which might be lubricated by oil. From what I've heard from the engineers who manufactured the compressor on the Boeing 787, is that there is absolutely no lubrication on the compressor bearings to pollute the air. They use bearings lubricated by air.

According to the presentation, the fume event or CACE are likely to occur at the beginning of the descent phase, but can they occur at other times?

It seems that many fume events were in that phase of the flight, but they are quite rare and the information is limited because the airline companies do not report all the CACEs. But what is clear is that if we have low RPM (revolutions per minute) in the engine and low thrust then obviously the compressor is producing not much pressure and we rely on the pressure of the air to be pushed through the labyrinth seals to hold the oil back. I understand it's a known problem but then the question is how much money do you want to spend to do something engineering wise to solve the problem.

Concerning the measurement in the air, you do not need to measure TCP, you just need to measure one substance that shouldn't be in the cabin unless something goes wrong with the oil and then take this as an indicator. For example ultrafine particles measured during the cruise were almost zero but when switching between sources APU and engine and then it was kind of 100 fold the concentration.

Portable sensor could be used on board to detect fume events, which are more reliable than the aircrew sense of smell. But to be effective, the sensor should be place in the ducts, so

the defective engine could be identify and the air supply from this engine could be switched off.

Is there a specific schedule for the filters maintenance or cleaning the ducts?

The maintenance schedule for plane does not include duct cleaning or even inspecting them, unless there is a problem and then there is maintenance advice for airlines.

Do you think that the physic characteristics of the air into the aircraft (very low humidity, dry air) could add something wrong to the health or pollution?

Temperature, humidity and pressure are regulated and adjusted during the flight. The pressure is a little bit lower than at sea level, but it also true in the mountains. Humidity is also low, that is why passenger and crew are encouraged to drink water. For the effect on chemicals, Pr Scholz does not have the answer as an engineer.

According to the presentation, the bearings are designed to leak. Is the quantity of oil drained of the dry cavity has ever been measured?

Pr Scholz has no answer.

Concerning the water in the plane is it really potable? In the restroom it is indicated that the water in not drinkable?

The water can be used for tea or coffee. It is called potable water system. There also is a problem with bacterial contamination of the water that has been aggravated with the airplanes on the ground because of the pandemic.

Do you know if Boeing intends to implement air sampling technology of the Dreamliner to its future airplanes?

I would just imagine that when they did the step to bleed free airplane with the 787 then they would stay with that decision with new airplanes. When Boeing gave a statement on why they made the airplane bleed free, they never said it was because of cabin air contamination. One thing I learned, as an engineer, is that if you have a good system design for a new airplane, don't tell it to the public, if all the other airplanes are working on the old principle because you would only highlight the problem with your other airplanes. This is the reason why Boeing never advertised any improvement on the cabin air quality with the 787. They mentioned a little bit of energy saving. Just after the Boeing 787, Airbus designed the 350, they had the chance to come up with a new design but they decided otherwise and designed a conventional airplane because they listened to the airlines, which just want working airplanes and not airplanes where engineers build their dream and new configurations.

Question asked after the audition

Could be some contamination of the cabin air generated by the Pack.?

A pack consists (among other parts) of a compressor and a turbine. There is a shaft and there are bearings. If the bearings are lubricated and the seals do not fully seal (seals never fully seal), then the oil can go into the cabin.

The pack can also be contaminated (e.g. from oil from the engine). If it is contaminated the contamination can go into the cabin.

So far, if the air generated by the pack is contaminated, the problem seems to be rather from a contamination of the pack by the air entering the pack (e.g. from oil from the engine) than from the pack itself.

Groupe de travail "Avion"**Compte-rendu de l'audition de la Direction de la sécurité de l'aviation civile sur l'organisation et les missions de la DSAC, les réglementations en vigueur pour les aéronefs, les personnels navigants****14 janvier 2022**

Etaient présents pendant l'audition:

- M. Corcos, M. Germa – DSAC
- M. Cabanes, M. Calonnec, M. Dumortier – OSAC
- M. Barguil, M. Chenuel, M. Gaie-Levrel, M. Iram, Mme Jargot, M. Nachon, Mme Ndyaye, – membres du groupe de travail (GT)
- Mme Keirsbulck, Mme Malrat-Domenge, Mme Paillat– Anses

L'objectif de cette audition est de recueillir des informations sur :

- L'organisation et les missions de la DSAC
- La réglementation en vigueur sur la certification des avions et les aptitudes en vol des personnels navigant (incluant les pilotes)
- Les « fumes events » et le syndrome aérotoxique

En amont de cette audition, un document présentant l'Anses, les objectifs des travaux d'expertise sur la "Qualité de l'air et les effets sanitaires chez les personnels navigants" et les objectifs de cette audition a été transmis à M. Corcos.

Audrey Malrat-Domenge, coordinatrice de ces travaux d'expertise initie l'audition par un tour de table avant de présenter l'Anses, ainsi que le contexte et les objectifs des travaux d'expertise sur la "Qualité de l'air et les effets sanitaires chez les personnels navigants".

Stéphane Corcos : chef de la mission évaluation et amélioration de la sécurité à la DSAC depuis 3 ans, après plusieurs années passées au BEA et dans d'autres bureaux de la DSAC.

Arnaud Callonec : chef du pôle entretien à l'OSAC, qui est une délégation de service public de la DGAC, dont le rôle est la surveillance d'organismes qui ont différents agréments dans l'aviation.

Dominique Dumortier : responsable de la section DMCP (département certification produits) de l'OSAC, en charge des activités relatives à la certification des produits.

Dr René Germa : chef du pôle médical, de la DSAC personnel navigant et secrétaire général du Conseil médical de l'aéronautique civile (CMAC), qui examine les dossiers de navigants qui demandent une imputabilité au service aérien.

Direction générale de l'aviation civile (DGAC)

La DGAC a des missions à la fois d'opérateurs publics, de contrôle et du trafic aérien, une mission régalienne et d'autorité de surveillance et de sécurité du transport aérien.

La DGAC, c'est environ 11000 agents dans différentes entités, dont :

- La direction des services de navigation aérienne (DSNA), l'opérateur public de contrôle aérien. C'est la direction qui rassemble la majorité des agents
- La direction du transport aérien (DTA), direction régaliennne (dont les droits de trafic internationaux, sûreté, défense, environnement...)
- La direction de la sécurité de l'aviation civile : prévention des accidents. Elle comprend environ 1000 – 1100 personnes.

Direction de la sécurité de l'aviation civile (DSAC)

La DSAC est l'autorité de surveillance et de sécurité du transport aérien. Elle couvre tout type de transport aérien, d'aéronef ultraléger motorisé (ULM) aux gros avions. C'est une activité très normée et réglementée de la mise sur le marché de l'avion, son utilisation, jusqu'au procédures de retour d'expérience. L'objectif étant d'améliorer en permanence la sécurité.

La gestion de la sécurité est un sujet central de dans l'aviation civile. Quand il y a des événements en service, le premier acteur est l'opérateur qui doit s'enquérir de l'évènement et prendre des mesures, puis faire suivre l'information aux différents acteurs de la chaîne. Cela peut être le constructeur de l'avion, l'autorité compétente nationale, ou européenne... Tous les comptes rendus d'évènements sont adressés à la DSAC (70 000 évènements par an)

Organisation de la DSAC :

- **Direction des personnels navigants** : constituée de 4 pôles, formation, examen, licence et médical. L'activité principal est la surveillance des personnels navigants, la certification des centres d'expertise et des médecins qui examinent le personnel navigant, les décisions sur des dossiers des « dérogations », c'est-à-dire de l'examen médical et des aptitudes de personnels navigants atteints de certaines pathologies.
- **Direction de la navigabilité et des opérations** : aptitude initiale et le maintien de navigabilité des aéronefs ou composants. Essentiellement de la vérification de conformités initiales et continues aux règlements. La partie opérations aériennes, porte sur la surveillance des compagnies aériennes qui sont aussi soumises à un certain nombre de de règlements qui touchent à la fois aux méthodes d'exploitation et aux entraînements et contrôles périodiques des équipages sur les connaissances techniques qu'ils doivent avoir sur une machine. Parmi les missions des compagnies aériennes, elle doit s'assurer que à chaque moment, elle n'opère que des avions navigables, avec des pilotes en bonne santé.
- **Direction des aéroports et navigation aérienne** : certifie les aéroports sur la partie infrastructure mais aussi procédure d'exploitation et système de gestion de la sécurité. Elle certifie également les prestataires de services de navigation aérienne
- **Direction de la sûreté** : la prévention des actes illicites.
- **Mission évaluation et amélioration de la sécurité** : mission transverse qui s'assure que l'ensemble de ces directions en silo fonctionne suivant les principes du programme de sécurité de l'État. C'est la feuille de de route commune qui vise à l'amélioration continue au-delà de l'application simple des règlements. La mission est essentiellement basée sur le retour d'expérience, donc l'utilisation des comptes rendus d'évènements à des fins de d'amélioration de la sécurité dans tous les domaines.

Il y une administration centrale de la DSAC, mais également des DSAC territoriales, Nord, Ouest. Le cas des territoires d'outre-mer bien que traité différemment, a des compétences analogues en matière de sécurité.

OSAC

L'OSAC est l'organisme délégataire de surveillance de la navigabilité et la conformité à la réglementation.

Il est en charge des activités relatives à la certification des produits. Cela porte sur la certification type initiale et le suivi de navigabilité qui consiste à faire une analyse continue avec les constructeurs de tous les incidents/accidents en service et le cas échéants de déployer des mesures correctives nécessaires. Les constructeurs doivent, tout au long de la vie de l'appareil, collecter les incidents de service et montrer que les objectifs initiaux de la certification type sont toujours satisfaits. Les normes évoluent en permanence pour garantir la sécurité du transport aérien.

L'OSAC délivre également les agréments pour les ateliers de maintenance en France. Si la majorité des opérations de maintenance d'Air France sont faites dans des ateliers français, d'Air France ou sous-traités, la maintenance peut aussi être faite n'importe où dans le monde, sous réserve que les ateliers situés à l'étrangers soient agréés par l'EASA. Tous les ateliers dans lesquels les compagnies aériennes européennes font leurs opérations d'entretien doivent être agréés par l'EASA. De même pour les compagnies américaines, les ateliers doivent être agréés par la FAA.

Bureau d'enquêtes et d'analyses pour la sécurité de l'aviation civile (BEA)

Le BEA, il est en mesure de se saisir et de mener une enquête sur des événements de *fumes events* si l'équipage a été mis dans une incapacité et que la sécurité de l'avion a été compromise. Depuis 15 ans, ils n'ont pas eu à se à se saisir sur ce type d'événements à la connaissance de la DGAC.

Application de la réglementation

Les constructeurs, au titre de la réglementation applicable, doivent collecter tous les événements indésirables, en faire l'analyse et présenter cette analyse de manière continue à l'autorité de certification, en l'occurrence la EASA, pour les avions certifiés européens. Par exemple, pour les avions Airbus, chaque famille d'avions fait l'objet, sur une base annuelle, d'une revue de tous les événements associés à émanations, fumées, odeurs, présentée à l'EASA. Cette présentation inclut, le cas échéant, le déploiement de mesures correctives. Dans le cadre du suivi de la navigabilité, les mesures correctives peuvent être mises en place immédiatement par les constructeurs et transmises pour application aux exploitants, qui se doivent de les appliquer. A ce jour, les problèmes d'odeurs/émanations liés au systèmes de conditionnement de l'air n'ont pas fait l'objet de mesures correctives, car non classifiés en « majeurs ». Ce qui ne signifie pas que la problématique n'est pas traitée par ailleurs. Par exemple, la DSAC a publié une info sécurité en 2020 sur le sujet. Une info sécurité est constituée de recommandations que les exploitants doivent considérer (sans obligations). Ce sont des rappels de sécurité, car les dispositions existent déjà dans la réglementation, sur lesquels la DSAC souhaite attirer l'attention. Cette info sécurité sur la prévention des émanations et des odeurs était à destination d'un grand nombre d'acteurs (transporteurs, organismes de maintenance, assistants en escale...). Si ces info sécurité ne sont pas d'application obligatoire, elles doivent être prises en considération. Lors des audits des différents acteurs du transport aérien, il est demandé comment les éléments de ces info sécurité ont été traités. Si les procédures recommandées ne sont pas mises en œuvre, il faut que ce soit justifié.

A noter, plusieurs générations d'avions se côtoient, certains sortent d'usine, d'autres ont 50 ans. Les navigants volent sur plusieurs avions dans leur carrière. La réglementation de certification qui s'applique est celle existante lors de la mise en service de l'avion. Certaines évolutions de la réglementation sont applicables rétroactivement, mais pas toutes.

« Fumes events »

Les « fumes events » qui sont rapportés ne sont majoritairement pas dus au système de conditionnement de l'air, c'est de l'ordre de 20 %. Par exemple, lorsqu'il y a un problème électrique qui engendre un échauffement, puis un dégagement de fumée, c'est une problématique de « *fume event* ». Concernant des odeurs, elles peuvent être associées à des événements de vie à bord (toilettes, cuisines...) et pas uniquement au système de conditionnement de l'air, c'est même très rare. Quand le système de conditionnement d'air est impliqué, dans la majorité des cas, ce n'est pas dû au système lui-même, mais à la qualité de l'air extérieur qui est prélevé.

Ces « *fume events* » sont notifiés à la DSAC. En effet, la réglementation européenne impose que tout événement de sécurité doit être notifié à l'autorité de sécurité, en plus du traitement par la compagnie aérienne. Sur les 70 000 événements notifiés à la DSAC tous les ans, il y a environ 3000 événements par an (2017 à 2019) de « *fume event* ». Dans ces événements de fumées, il y a de nombreuses causes : le tabac (13 %), les odeurs de cuisine (22 %), par exemple il peut rester des résidus dans les fours, qui peuvent dégager des fumées, les appareils apportés par les passagers, comme les batteries externes qui peuvent se mettre à fumer... Il y a également dans ces 3000 notifications, des événements liés au dysfonctionnement des systèmes de détection de fumées qui peuvent se déclencher, alors qu'il n'y a pas de fumée.

La DSAC traite particulièrement les événements aigus qui peuvent mettre en danger la sécurité de l'avion, dans un objectif d'amélioration de la sécurité, en raison :

- Du risque d'incendie,
- Du fait que ces fumées/émanations peuvent être des indices précurseurs d'un dysfonctionnement d'un composant,
- Du fait que ces émanations peuvent entraîner l'incapacitation des pilotes.

Les notifications d'événements font l'objet d'une classification du risque, pour les événements de fumées, 82 % sont classifiés à un niveau de risque bas, 11 % à un niveau moyen. Pour le niveau de risque haut, il n'y a qu'un événement sur les 5 dernières années.

Les problèmes qui peuvent être classiquement et typiquement associés au système de prélèvement d'air sont des problèmes liés à la fuite d'huile dans un des systèmes connexes. Cette huile vient contaminer le circuit d'air qui est prélevé car le prélèvement de l'air se fait au niveau de la partie basse pression du compresseur du moteur, en amont de l'injection du carburant. Dans cette zone, les températures peuvent atteindre 300 °C ce qui peut entraîner des combustions si de l'huile est pulvérisée et peut ultimement générer des odeurs en cabine. Mais les quantités d'huiles dans le moteur sont très faibles. Si tout le système était vidé, ce serait de l'ordre de quelques litres et le moteur serait perdu, ce qui n'arrive pas. A noter, la notion de la toxicité de ces émanations, n'est pas intégrée dans les critères de certification. Ce qui est intégré, c'est que toute panne ou défaillance d'un système, si elle est admise, ne doit pas créer de dommage aux occupants de l'avion. En cas de panne, le processus de certification prévoit des équipements spécifiques, en cas d'urgence classique, qui protégeront l'équipage, par exemple via le système de fourniture en oxygène.

Santé des personnels navigants

Les pilotes doivent justifier d'une aptitude physique à voler, à renouveler à intervalles régulier. Il y a un examen initial, puis des renouvellements périodiques. Lors des renouvellements des examens complémentaires peuvent être demandés. Toutes les pathologies sont passées en revue. La majorité des aptitudes sont délivrées dans les centres d'expertise, par les médecins examinateurs agréés. Pour les pathologies plus complexes, c'est le médecin évaluateur qui prend une décision. L'aptitude peut être assortie de restrictions, par exemple, la présence obligatoire d'un deuxième pilote, une durée de validité limitée...

Cette visite médicale réglementaire d'aptitude est réalisée tous les ans ou tous les six mois en fonction de l'âge. Les normes de cette visite sont internationales, déclinées par l'EASA. Les normes internationales ont des exigences « plancher », mais l'EASA va au-delà. La population des personnels navigants est extrêmement bien suivie et finalement, il y a peu de perte de licence. Au niveau des PN, il y a environ 10 000 pilotes professionnels et 40 000 PNC. La CMAC voit 1500 dossiers par an pour des problèmes de santé important. Ces 50 000 personnels navigants sont des professionnels titulaires d'une licence française, une partie des personnels navigants peut être employée par des compagnies étrangères, mais la grande majorité est employée par des compagnies françaises. A noter les personnels navigants français qui sont basés en France, mais travaillent pour des compagnies étrangères, doivent être affiliés à la caisse de retraite du personnel navigant. De manière marginale, des licences peuvent être obtenues auprès d'autres pays européens, membre de l'EASA. Cette dernière mène tous les 3 ans des inspections de standardisation pour s'assurer que chaque Etat applique les règlements avec le même niveau de rigueur demandé par l'EASA.

Concernant les pathologies des personnels navigants qui amènent à des inaptitudes, il n'y a pas de statistique consolidée. Cela concerne très peu de cas, pour les PNT ce sont des pathologies cardiaques qui sont majoritaires et les pathologies psychiatriques chez les PNC. Concernant les pathologies professionnelles, à une époque, il y avait beaucoup d'otites barotraumatiques, mais les mesures de prévention ont limité ces pathologies. Il y a beaucoup de mesure de prévention, par exemple, de l'époque du Concorde, qui volait à une altitude plus élevée, des expositions aux rayonnements cosmiques ont été suspectées, des dosimètres ont donc été embarqués et des procédures de descente d'urgence ont été mise en place en cas de dépassement du seuil. Concernant les rayonnements ionisants, la DGAC a mis en place un programme de surveillance des doses reçues par les personnels navigants, et qui sont communiquées à la médecine du travail. Ces doses sont toujours en dessous des 5 mSv, qui constitue un seuil réglementairement toléré.

Autre

Air France a lancé trois projets :

- Avec la société Covariance : utilisation de capteurs dans les certains avions, dans l'objectif de capter les molécules d'odeurs (rapporté par l'équipage), dans l'objectif de faire des corrélations. Pour l'instant seul un évènement a été enregistré depuis un an.
- Avec la médecine d'Air France : utilisation de seringues de prélèvement d'air, lorsque l'équipage se plaint d'une odeur, afin de les analyser.
- Avec une université allemande : analyse des filtres HEPA

Groupe de travail "Avion"

Compte-rendu de l'audition du Service de Prévention et de Santé au Travail d'Air France pour l'expertise sur la qualité de l'air dans les avions et la santé des personnels navigants

10 mai 2022

Etaient présents pendant l'audition:

- Dr. Klerlein et Dr. Bouton – Service de Prévention et de Santé au Travail d'Air France
- M. Barguil, M. Chenuel, M. Dewitte, M. Joubert, M. Nachon – membres du groupe de travail (GT)
- Mme Malrat-Domenge, Mme Paillat, Mme Papadopoulos – Anses

L'objectif de cette audition est de recueillir des informations sur :

- L'organisation et les missions du Service de Prévention et de Santé au Travail d'Air France
- Les données sur la santé des personnels navigant
- Les « fumes events » et le syndrome aérotoxique

En amont de cette audition, un document présentant l'Anses, les objectifs des travaux d'expertise sur la "Qualité de l'air et les effets sanitaires chez les personnels navigants" et les objectifs de cette audition a été transmis au Dr. Klerlein.

Dr Michel Klerlein: médecin du travail, initialement médecin généraliste avant de se reconverter 1991 vers la médecine du travail en 1991. Il est diplômé de médecine aéronautique. Après 5 ans de médecine du travail dans un service interentreprise, il rejoint Air France en 1999, d'abord médecin du travail dans le secteur de la maintenance jusqu'en 2010, puis médecin coordinateur, au niveau corporate pour Air France. Depuis 2012, il est également médecin du travail pour le personnel navigant (30 % d'activité de médecin du travail et 70 % de médecin coordinateur).

Dr Marie-Christine Bouton : médecin du travail, chez Air France depuis 20 ans.

Le service de prévention et de santé au travail

Air France emploie environ 45000 salariés, dont 42100 en contrat de droit français suivis en médecine du travail. Il y a environ 17500 personnels navigants.

Air France assure la maintenance de ses propres avions, mais également la maintenance (50 %) pour d'autres compagnies (50 %).

Le service médical d'Air France est autonome et suit 92 % des salariés de droit français d'Air France, ainsi que le personnel francilien de la compagnie HOP (500 salariés fin 2022). Le service est agréé par la DRIETS IDF pour une durée de 5 ans depuis septembre 2020.

Les salariés non suivis par le service médical d'Air France sont suivis en service médical inter-entreprise.

Le service est composé de 25 médecins du travail, 62 infirmières et environ 14 personnes administratives réparties dans 13 services médicaux, essentiellement en IDF (7 services en régions : Nice, Valbonne, Marseille et Toulouse).

Les missions du service sont celle définies par le Code du travail :

- études de poste,
- conseils à l'employeur,
- suivi individuel des salariés,
- traçabilité des expositions,
- actions de santé publique,
- information et formation,
- études et recherche.

Le service a également des missions de vaccination, de prévention des risques psychosociaux, des cellules d'écoute, d'accueils équipages, formation du management, secourisme...

Le suivi de santé au travail du personnel navigant et les données médicales les concernant

La majorité des salariés est âgée entre 45 et 54 ans. Les personnels navigants qui ont une carrière quasi complète, s'arrêtent généralement à 55 ans. Ils bénéficient d'une caisse de retraite autonome qui peut leur verser une rente à partir de l'âge de 55 ans, cumulable avec une inscription de demandeur d'emploi. Aujourd'hui avec le quasi plein-emploi, il est de plus en plus demandé au personnel de rester en activité, jusqu'à l'âge légal de la retraite.

Les personnels navigants techniques (PNT) ont un examen médical tous les deux ans, et tous les quatre ans pour les personnels navigants commerciaux, avec une visite intermédiaire de suivi renforcé deux ans après le dernier examen médical d'aptitude.

Les personnels navigants ont également des visites médicales de licences. Les deux examens sont différents, les objectifs sont différents. Pour la visite de licence, l'objectif est la sécurité des vols, conformément à la réglementation européenne, pour la visite médicale du travail l'objectif est le risque d'altération de la santé du fait de travail.

Ils sont exposés à des rayonnements cosmiques (pour les moyen-courrier : 1-3 mSv ; long courrier : 2-5 mSv par an en dose collective moyenne). C'est la population de travailleur la plus exposée aux rayonnements ionisants en dose collective, supérieure au secteur du nucléaire. En dose individuelle, seul le personnel de santé a une exposition supérieure.

En plus des visites réglementaires, les personnels navigants peuvent demander des visites pour divers motifs :

- pré-vol : essentiellement pour des évaluations du risque baro-traumatique lors de viroses ORL/pulmonaire
- post-vol : syndromes fébriles, test de paludisme, stress post-traumatique (décès à bord, événement géopolitique ou géophysique à l'escale, incident aéronautique). Une à deux fois par an des personnels navigants peuvent venir suite à un *fume event*. Cela est assez rare, peut-être car le service n'est pas directement dans l'aérogare, et qu'il faut faire une demande de visite. Suite à des *fume event* les personnels navigants vont plus généralement dans les services médicaux des aéroports ou les urgences hospitalières.
- hors contexte de vol : aménagement de postes (exclusion de certaines destinations,

importance du décalage horaire...).

En termes d'absences pour maladie, en 2019, pour les personnels navigants, les taux sont proches des statistiques nationales. Les PNC ont un taux d'absentéisme plus élevé que les PNT, respectivement, 4,32 % et 2,33%. Le service médical n'a pas systématiquement accès au motif de l'arrêt maladie, cependant, il peut interroger le salarié lors de sa visite médicale de reprise ou lors de la visite périodique. Le service tient quelques statistiques depuis l'année 2000. Chez les PNC, les pathologies principales, sont les dorsalgies (10 %), puis les rhinopharyngites (5 %), chez les PNT, les rhinopharyngites (14 %), puis les dorsalgies (9%). La rhinopharyngite est un motif d'arrêt maladie en raison des risques barotraumatiques. Le reste des pathologies est similaire à la population générale. Il n'y a pas d'arrêt pour des neuropathies.

Il n'y a pas de pathologie respiratoire dans les motifs d'arrêts maladie, cela peut être dû au travailleur sain, les asthmatiques sévères n'étant pas aptes à voler. Par ailleurs la qualité de l'air dans la cabine est saine, sans allergène, les personnes allergiques se sentent mieux lorsqu'elles travaillent.

Pour les accidents du travail, les taux pour les PNT et PNC sont respectivement 0,97 % et 0,20 %. Les otites barotraumatiques sont toutes déclarées en accident du travail chez Air France, ce qui n'est pas le cas dans toutes les compagnies aériennes. Elles représentent 30 à 40 % des accidents chez les PNC. Le reste des accidents concernent essentiellement les TMS.

Pour les maladie professionnelles (tableau), les TMS sont les pathologies les plus représentées, puis otites chroniques, surdité, covid, hernie discale, amibiase, pathologies de l'amiante, rayonnements ionisants. Pour les maladies hors tableau pour 46 cas déclarés, 3 ont été reconnus, 2 états anxio-dépressifs et 1 gale.

Syndrome aérotoxique

Un syndrome n'est pas une maladie, c'est une association de symptômes et de signes cliniques. Un même syndrome peut correspondre à des maladies d'origine différente.

L'air de la cabine est prélevé aux étages intermédiaires et hautes pressions des turbines moteurs, à l'exception du Boeing 787. L'idée est que le prélèvement au niveau du moteur pourrait entraîner une contamination de l'air par des polluants issus du moteur, dont l'huile des turbines qui contient les organophosphorés (TCP, dont ToCP, neurotoxique reconnu). Les effets allégués sont des effets extrêmement divers, ce qui justifie l'approche syndromique. Il y a des symptômes dans les domaines :

- neurologique : des symptômes banals de type maux de tête ou sensations vertigineuses, à des choses plus g nantes comme des pertes d'équilibre, des engourdissements, fourmillements, parésies...
- neuro-psychiatrique : anxiété, dépression, trouble du sommeil, confusion
- autres : inconfort abdominal, nausée, fièvres, difficultés respiratoires

Le ToCP est un neurotoxique reconnu qui provoque des neuropathies périphériques extrêmement graves, qui ont été décrites lors d'expositions accidentelles, le plus souvent par ingestion. Il dispose d'une VLEP de 100 ug/m³. C'est une des substances responsables de l'OPIDN.

Un autre polluant incriminé est le CO, gaz inodore responsable d'intoxication oxycarbonée dont les symptômes neurologiques précoces sont proches de ceux rassemblés dans le syndrome aérotoxique. Cela ne concerne pas l'aviation de transport de passagers mais la toute petite aviation ou alors le transport de passagers de type aviation d'affaires, qui ont d'autres types de moteurs que les gros porteurs.

Concernant les marqueurs biologiques, notamment les dosages de cholinestérases, il y a un problème sur les faibles doses, et des variabilités intra et interindividuelle de l'ordre de 30%. Ce qui rend toute interprétation hasardeuse. Il n'y a pas de dosage systématique préconisé chez Air France.

La recherche d'adduit à 80 Da de phosphorylation de la butyrylCholinestérase, s'est montrée négative chez 30 PN et n'a pas été suivie de développement de routine.

La recherche d'auto-anticorps anti divers éléments du système nerveux central pose le problème de la spécificité du test.

Sur le plan purement clinique, il n'y a pas de maladie connue qui corresponde au syndrome aérotoxique, du fait que la symptomatologie est variable et la clinique non systématisée. Cette symptomatologie peut faire penser à ce qui a été mis en avant dans les intolérances environnementales idiopathiques, telles que le syndrome des bâtiments malsains ou l'électrosensibilité, le syndrome d'intolérance aux auteurs chimiques... Les sociétés savantes de médecine aéronautique considèrent qu'une origine toxique est peu probable.

Actions mises en place chez Air France

Renforcement de la traçabilité de tous les événements

Un questionnaire est systématiquement envoyé à chaque personnel navigant lorsqu'une odeur ou un événement « feu / fumées / odeurs » (FFO) est déclaré sur un vol. Ces vols sont portés à la connaissance du service médical par une base de données commune alimentée par les *pilots report* ou les *cabin safety report*, ainsi que les signalements du CHSCT et les déclarations d'accident du travail.

Entre 2017 et 2022, il y a eu 2028 questionnaires envoyés avec un taux de réponse de 62,5 %. 50 % des personnels navigants ne déclarent aucun symptôme, sachant que les odeurs peuvent être localisées, et donc ne pas être ressenties par tout l'équipage.

Les principaux symptômes déclarés sont :

- 30% d'irritation au niveau des yeux ou de la gorge
- 23% de max de tête
- 12 % de gênes respiratoire

Concernant les mesures adoptées par les personnels navigants, 70 % déclarent n'avoir rien fait, 10 % ont mis leur masque à oxygène, 4 % se sont humidifié le visage et 2 % ont pris des médicaments présents dans la trousse de premier secours. Concernant les masques à oxygène, ils sont utilisés principalement, voir exclusivement par les pilotes, car facilement accessibles et utilisables. Pour les PNC, le port de la cagoule n'a qu'une autonomie de 15 minutes, sur un vol long courrier, l'aéroport accessible pour un atterrissage d'urgence est généralement à une durée de vol plus importante. Par ailleurs, vis-à-vis des passagers, cela aurait un effet anxiogène, car ils ne seraient pas équipés. Ces cagoules ne sont pas utilisées pour de simples odeurs.

Suivant l'évènement, seul 12 % des répondants ont déclaré être allés voir un médecin, principalement les services médicaux de l'aéroport ou d'Air France, respectivement 35 et 32 %. 13% des personnels navigants sont allés à l'hôpital et 20 % ont consulté leur généraliste.

Pour les traitements proposés, dans 68 % des cas il n'y en a pas, de l'oxygène a été donnée dans 5 % des cas. Pour les médicaments proposés, il s'agissait d'anti-douleurs, anti-nauséeux ou anti-asthme.

Concernant les examens réalisés, il y a la vérification de la saturation en oxygène (50%), des tests du souffle (19 %), recherche de CO dans l'air expiré (9 %), ECG (7%) et une prise de sang (22%). Dans 13 % des cas aucun examen n'a été réalisé.

A noter, ces données ne portent pas que sur des « *fume events* » en lien avec le système de conditionnement de l'air, mais sur tout type d'odeur, car au moment de l'envoi du questionnaire, la cause n'est pas toujours identifiée.

Les personnels navigants peuvent avoir été orientés vers les centres antipoison.

Sensibilisation des personnels navigants

Pour la sécurité des vols, il y a la question de la mise en danger du vol par ces odeurs. La tendance est d'inciter les personnels navigants à ne pas sous-estimer les odeurs, même celles qui peuvent sembler être de la vie courante. Des modules de formations sont introduits dans les formations régulières que doivent suivre les personnels navigants, lors desquels, les personnels navigants sont entraînés à détecter des odeurs, *via* des boîtes à odeurs (kérosène, chaussettes mouillée, batterie au lithium qui commence à chauffer) et à réagir en cas d'odeurs « suspecte ». Ces formations et ces incitations ont tendance à augmenter le nombre de déclaration.

Les pilotes sont incités à porter le masque à oxygène en cas de FFO.

Il y a des campagnes d'information sur la problématique des FFO.

Air France n'émet pas de recommandation spécifique pour des examens post-exposition. En cas d'urgence médicale, tout service d'urgence est capable de traiter une intoxication aiguë qui engagerait le pronostic vital. Il est donc conseillé aux personnels navigants de se rendre dans un service d'urgence hospitalier en cas d'urgence vitale. S'il n'y a pas d'urgence vitale, les personnels navigants sont accueillis dans le service pour un bilan clinique.

Qualité de l'air dans la cabine

L'air extérieur est prélevé dans les moteurs, pour être conditionné (pression, température) et mélangé à l'air de recirculation dans les packs de conditionnement de l'air. L'air de recirculation est filtré par des filtres HEPA et l'air est renouvelé 20 à 30 fois par heure.

En mode nominal, l'air de la cabine est exempt de polluant organique, à l'exception de l'alcool servi pendant le vol et de ce qu'apportent les passagers (parfums...). Il pouvait y avoir des insecticides pulvérisés dans les vols desservant certaines zones, mais chez Air France cela a été remplacé par une application de perméthrine, sur les parois, qui n'est pas relarguée, les moustiques sont tués lorsqu'ils se posent sur les parois.

En mode dégradé, il peut y avoir des évènements FFO, dont des *fume events*. La fréquence des *fume events* déclarés est comprise entre 100 et 150 par an depuis 2018 (sauf année Covid), pour entre 1000 et 1300 vols par jour sous la bannière Air France. Les odeurs les plus

fréquemment rapportées sont les odeurs de chaussettes mouillées et de plastique chaud. Les phénomènes sont rares, ce qui explique qu'ils soient difficiles à capter et qu'il y ait peu de données, pas de prélèvements lors d'incidents ou alors par hasard. Les données de la littérature analysées par le Dr Klerlein montrent beaucoup de prélèvements inférieurs à la LOD ou LOQ. Les concentrations de TCP ou de ToCP sont soit indétectables, soit tellement faibles que au sens de la toxicologie classique on est très bas dans la relation dose/ effets. Dans l'étude AVOIL de 2017, on ne trouve plus de ToCP dans les huiles, les industriels l'ont substitué. Les études toxicologiques *in vitro* sur les effets de l'huile pyrolysée sur l'activité neuronale ne montrent pas d'effet. A noter que, même dans les Boeing 787 du TCP a pu être détecté, alors qu'il ne prélève pas d'air dans les moteurs. Il y a donc d'autres sources à rechercher.

Il y peut y avoir des ingestions de liquide de dégivrage par l'APU, ce qui peut entraîner des odeurs en cabine. Suivant les préconisations d'Airbus, des actions correctives ont été mise en œuvre avec le placement d'une gouttière à proximité de l'APU pour dévier les liquides de dégivrage. La mise en œuvre de cette solution a permis de réduire fortement les FFO dans les pays nordiques.

Des filtres de recirculation anti COV ont été installé. Des capteurs ont été installés dans certains avions, ils mesurent en continue, avec horodatage, certains composés chimiques (CO, NO..., mais pas de composés trop complexes, du fait que les capteurs sont des détecteurs électrochimiques).

Projet AviSan

C'est un projet mené en partenariat avec l'université Paris Descartes, l'INSERM et Air France. L'objectif est de :

- Documenter et quantifier dans l'air des cabines, les polluants chimiques pouvant entraîner des effets neurotoxiques immédiats ou différés, notamment les additifs organophosphorés des huiles en présence et en absence d'événements feux fumées
- Identifier les déterminants de ces événement feux fumées (EFF) liés aux modalités de vol
- Comparer la symptomatologie et les performances cognitives des personnels navigants selon qu'ils sont exposés ou non à des événements.

L'étude prospective a été définie sur une période de 12 mois, sur l'intégralité de la flotte (150 appareils ; > 500 vol/jour). La population d'étude est pour le groupe « exposés », les effectifs doivent être de 600 sujets exposés, pour 100 vols avec un EFF. Pour chaque vol avec EFF, il y a aura un vol témoin avec le même type d'appareil, avec des prélèvements d'air, effectués dans la semaine suivant le vol exposé, sur le même trajet, au même moment de survenue de l'évènement. Les équipages de ces vols seront les témoins.

Pendant le vol « exposé » les personnels navigants devront mettre en fonctionnement une pompe, positionnée à l'endroit où l'odeur est la plus ressentie. Les filtres de ces pompes seront analysés pour rechercher les organophosphorés. Le CO sera également recherché avec des prélèvements au moyen de seringues lors des EFF. Les personnels navigants compléteront des auto-questionnaires sur les caractéristiques du vol et de l'EFF.

Concernant la conservation des échantillons, ils seront entreposés dans l'habitacle jusqu'au retour de l'avion sur sa base en France. Dans un délai de 25 à 30 h après l'EFF, les échantillons sont expédiés à l'IRBA par taxi.

Concernant le volet « santé », dans les 48h suivant les vols (exposés et témoins), les personnels navigants devront compléter des tests neurocognitifs. Trois mois plus tard, ils feront un bilan clinique et neurologique standardisé, au service médical d'AF, avec 3 examens,

- répéter l'examen neurocognitif avec les tests, fait initialement
- un examen neurologique
- un examen de posturographie (mesures des oscillations pendant 30s, yeux fermés et ouverts).

[Documents transmis après l'audition](#)

- diaporama présenté lors de l'audition

Groupe de travail "Avion"**Compte-rendu de l'audition du service de médical d'urgence de l'aéroport Charles de Gaulle sur l'organisation et les missions du Service médical d'urgence et de soins de l'aéroport Charles de Gaulle et sur le « Syndrome aérotoxique »****10 juin 2022**

Etaient présents pendant l'audition:

- Dr. Thomas – Service médicale d'urgence - Aéroport de Paris
- M. Dewitte, M. Gaie-Levrel, M. Joubert, M. Nachon – membres du groupe de travail (GT)
- Mme Malrat-Domenge, Mme Paillat – Anses

L'objectif de cette audition est de recueillir des informations sur :

- L'organisation et les missions du Service Médical d'Urgences et de Soins de l'aéroport Charles de Gaulle
- Les « fumes events » et le syndrome aérotoxique

En amont de cette audition, un document présentant l'Anses, les objectifs des travaux d'expertise sur la "Qualité de l'air et les effets sanitaires chez les personnels navigants" et les objectifs de cette audition a été transmis au Dr. Thomas.

Le Dr. Patrick Thomas, médecin urgentiste, avec une longue carrière au SAMU, d'abord au 94 puis au 93. Il a également effectué de nombreux rapatriements sanitaires. Il est le chef du service médical de l'aéroport Charles de Gaulle depuis novembre 2018.

Audrey Malrat-Domenge, coordinatrice de ces travaux d'expertise initie l'audition par un tour de table avant de présenter l'Anses, ainsi que le contexte et les objectifs des travaux d'expertise sur la "Qualité de l'air et les effets sanitaires chez les personnels navigants". La parole est ensuite laissée à M. Thomas pour présenter les missions du service médical d'urgence (SMU) de l'aéroport de Charles de Gaulle et apporter les réponses aux questions transmises en amont de l'audition par l'Anses. La présentation est ponctuée d'échanges avec le groupe de travail.

Missions et fonctionnement du service médical d'urgence (SMU) de l'aéroport de Charles de Gaulle

Cadre juridique et organisation

Le statut du SMU est défini par le décret n°2017 471 du 3 avril 2017 relatif à la mise en œuvre du règlement sanitaire international.

Conformément à l'Article D 3115 20 du Code de la Santé Publique, le gestionnaire d'un point d'entrée sur le territoire (dans le cas présent ADP) doit disposer d'un Service Médical, en

propre ou par convention, chargé de l'examen médical et de la prise en charge sur place des personnes aux heures d'ouverture du point d'entrée au public, et doit contribuer aux missions suivantes

- Assurer des consultations médicales de premiers recours au sein du point d'entrée
- Participer à l'Aide Médicale Urgente (Article L.6311 1 du Code de la Santé Publique)
- Participer au contrôle sanitaire des voyageurs en cas d'urgence sanitaire internationale (Article R. 3115 5 du Code de la Santé Publique)

C'est un centre de Santé agréé par l'ARS et conventionné secteur 1 par la CPAM pour les assurés sociaux. Il y a une convention tripartite entre le groupe ADP, l'APHP dont dépendent les SAMU 93 et 94 et l'ARS.

Ces services sont plus ou moins dimensionnés en fonction des points d'entrées sur le territoire. ADP a choisi d'avoir son propre service, le Dr. Thomas est salarié à temps plein, appuyé par 15 médecins à temps partiel effectuant 4 gardes/mois, en parallèle de leur activité temps partiel de praticiens hospitaliers aux urgences et/ou au SAMU.

Le SMU de Roissy est ouvert aux heures d'ouverture au public de l'aéroport, conformément à la loi, soit 24h/24. Orly ferme la nuit de 23h00 jusqu'à 4h et quelques du matin, mais un service minimum est assuré notamment en cas d'accidents de travail.

En termes d'activité, les missions peuvent être rapprochées de celles d'un dispensaire, avec des visites diverses et variées, des passagers ou personnels navigants qui viennent parce qu'ils ont eu mal aux oreilles, qu'ils ont fait une chute... a des travailleurs de l'aéroport qui peuvent avoir des accidents du travail plus graves. C'est de la médecine de premiers recours.

Son rôle est important, dans la configuration d'un aéroport où la sûreté prime sur la santé, et où les services d'urgences « classiques », SAMU, pompiers... ne peuvent intervenir qu'après avoir passé les contrôles de sûreté. Or le code de la santé publique stipule également que chaque citoyen doit pouvoir disposer de service de soin d'urgence en moins de 30 minutes. Le SAMU met beaucoup plus de 30 minutes pour pouvoir accéder au pied d'un avion.

Missions

- **Primo-intervenant dans la gestion de l'urgence collective**
 - Accident collectif à effet limité
 - Les actes terroristes

Le SMU est le primo-intervenant, mais les interventions sont sous l'autorité et la responsabilité de la Préfecture.

- **Aide médicale urgente** : Toute demande de secours médicaux est régulée par le centre 15, comme pour l'ensemble du territoire français. C'est le médecin régulateur du SAMU (93 à CDG et 94 à Orly) qui décidera du vecteur à engager pour y répondre (les pompiers et/ou le service médical de l'aéroport).

Le service gère beaucoup d'accidents du travail avec plus de 120 000 travailleurs sur le site de Roissy (2019). Concernant les passagers il y a plus de 84 millions de passagers qui transitent par Roissy (2019). Pour gérer ces urgences, le service fonctionne comme un « mini hôpital » avec une salle de déchoquage...

Le service est équipé de véhicules d'urgence qui leur permettent d'intervenir rapidement sur les pistes, à bord des avions...

- **Aide médicale individuelle**

- consultation de médecine générale
- médecine d'urgence
- petite traumatologie (sutures...)
- gestion des accidents de travail survenus sur l'emprise aéroportuaire (convention avec certaines entreprises)

Le flux de patients est hétérogène : passagers, travailleurs sur site (incluant les personnels navigants), visiteurs ainsi que des populations riveraines. Il y a eu 13396 passages en 2020 (33145 en en 2019).

- **Centre de vaccinations internationales (9000 vaccinations en 2019)**

- **Contrôle sanitaire aux frontières (Règlement sanitaire international Décret n 2017 471 du 3 avril 2017)**

C'est un SMU points d'entrée sur le territoire qui :

- assure un rôle dans la gestion des situations sanitaires exceptionnelles
- participe au côté de l'ARS au contrôle sanitaire aux frontières
- participe aux campagnes d'information et de prévention (Ebola, pèlerinage à la Mecque...)
- met en place des dispositifs de contrôle et de filtrage
- participe aux interventions médicales spécialisées et transferts vers établissements hospitaliers

- **Autres missions**

- Médecine légale du vivant
- Biomédecine (transport d'organes...)
- Autres : accueil de réfugiés, victimes de conflits, climat...

Composition du service

- 1 médecin urgentiste chef de service
- 1 cadre de santé, adjoint au chef de service
- 1 agent administratif chargée des recouvrements (télétransmission, facturation...)

En garde H24, au minimum:

- 2 médecins urgentistes (effectif 14)
- 1 Infirmier coordonnateur (effectif 6)
- 2 Infirmier de soins (effectif 12)
- 2 ambulanciers (effectif 12)

Syndrome aérotoxique

Le Dr. Thomas souligne que la forme clinique du « syndrome aérotoxique » est un phénomène assez « mystérieux » pour les cliniciens. Aujourd'hui, il n'y a pas de conduite spécifique à tenir pour objectiver ce syndrome. Il espère que les travaux d'expertise de l'Anses, pourront éclairer le débat sur le sujet. Le service médical est prêt à travailler sur le sujet et à prendre en charge les personnels navigants, mais il lui faudrait une conduite à tenir, un protocole de diagnostic à mettre en œuvre. L'Anses précise que les résultats de

l'expertise ne seront sans doute pas aussi précis en terme de diagnostic, mais que des recommandations de recherche seront probablement formulées.

Le Dr. Thomas indique qu'il n'a jamais eu de passagers se présentant pour une exposition à un *fume event* ou un problème lié à la qualité de l'air dans un avion. Par ailleurs, seuls des personnels navigants d'Air France, et plus rarement d'Easyjet se sont déjà présentés pour cela au service médical de l'aéroport de CDG.

Les médecins du service peuvent se sentir démunis lorsque des personnels navigants se présentent (c'est généralement plusieurs membres d'équipages qui se présentent en même temps) se disant exposés à un *fume event*. L'équipage peut demander des analyses médicales, comme une prise de sang, mais il ne sait pas quoi rechercher. Il a dû intervenir deux fois ~~sur~~ dans des avions suite à des appels de l'équipage. Celui-ci était équipé de masques de fuite, alors que les passagers continuaient « leurs activités » sans montrer de signe d'inquiétude.

Il est étonné du polymorphisme des symptômes, sans apporter de jugement de valeur, ces doléances peuvent lui faire penser à d'autres pathologies où des patients se plaignaient de symptômes sans que les médecins puissent déterminer l'origine et pour lesquelles il reste des questionnements (ex syndrome des bâtiments malsains). Il est important d'écouter ces patients, mais dans le contexte d'un service d'urgence, qui peut être pris par des urgences « vitales » c'est parfois difficile, à regret, de trouver le temps nécessaire.

Le service médical a une convention avec Air France pour la gestion de leurs accidents de travail. D'un point de vue administratif, les cas du personnel navigant d'Air France se présentant pour une exposition à un *fume event* sont qualifiés en accident du travail. En l'absence de problème organique factuel nécessitant une prise en charge en milieu hospitalier (intoxication CO, trouble neurologique objectif, etc.), ces cas sont consignés dans le registre "accident travail bénin", avant d'être réorientés vers la médecine du travail.

Pour d'autres compagnies, il n'y a pas de convention, donc le certificat médical de déclaration d'accident du travail est complété, et les patients sont adressés vers leur médecine du travail.

Concernant l'absence de passagers se présentant pour un problème lié à la qualité de l'air dans un avion, l'Anses souligne que c'est peut-être un défaut d'information. Les personnels navigants sont informés de la problématique, la caractérise notamment par « l'odeur de chaussettes mouillées », mais un passager « lambda » va simplement noter une odeur désagréable sans l'associer à un risque potentiel.

Il mentionne l'organisation d'une journée scientifique par le service médical d'Air France, le 23 novembre 2018, qui exposait la problématique d'un point de vue scientifique avec des experts, mais également des échanges avec des personnels navigants. L'historique de la problématique a pris sa source en Nouvelle-Zélande et en Australie avant d'arriver en France depuis 4-5 ans.

[Document transmis après l'audition](#)

- Diaporama présenté lors de l'audition

Groupe de travail "Avion"**Compte-rendu de l'audition du service de maintenance d'Air France sur le fonctionnement et la maintenance du système de ventilation des cabines et les « fumes events »****24 juin 2022**

Etaient présents pendant l'audition:

- M. Groseille – Air France
- M. Barguil, M. Dewitte, M. Gaie-Levrel, Mme Jargot, M. Joubert – membres du groupe de travail (GT)
- Mme Malrat-Domenge – Anses

L'objectif de cette audition est de recueillir des informations sur :

- Le fonctionnement et la maintenance du système de ventilation des cabines
- Les « fumes events » et le « syndrome aérotoxique »

En amont de cette audition, un document présentant l'Anses, les objectifs des travaux d'expertise sur la "Qualité de l'air et les effets sanitaires chez les personnels navigants" et les objectifs de cette audition a été transmis à M. Groseille.

M. Patrick Groseille est responsable engineering et flotte à la direction de la maintenance Air France. Il a en charge la prescription de l'entretien sur toute la flotte d'Air France, ainsi que la performance, de l'économie et de la navigabilité des flottes.

Audrey Malrat-Domenge, coordinatrice de ces travaux d'expertise initie l'audition par un tour de table avant de présenter l'Anses, ainsi que le contexte et les objectifs des travaux d'expertise sur la "Qualité de l'air et les effets sanitaires chez les personnels navigants". La parole est ensuite laissée à M. Groseille pour présenter les missions du service de maintenance d'Air France et apporter les réponses aux questions transmises en amont de l'audition par l'Anses. La présentation est ponctuée d'échanges avec le groupe de travail.

Fonctionnement des systèmes de ventilation de la cabine

L'air dans la cabine est constitué de 50% d'air recyclé et de 50 %d'air extérieur. Le mélange air extérieur/air de recirculation est renouvelé 20 à 30 fois par heure, soit un renouvellement du volume total toutes les 3 minutes maximum. Tous les systèmes sont conçus pour fournir environ 0,28 m³.min⁻¹ d'air frais par occupant, en fonctionnement normal.

Il existe actuellement 3 architectures pour l'alimentation en air extérieur de la cabine :

- Prélèvement d'air (moteur ou APU), sans filtration COV de l'air de recirculation
- Prélèvement d'air (moteur ou APU), avec filtration COV de l'air de recirculation
- Captation directe d'air extérieur, uniquement une le Boeing 787

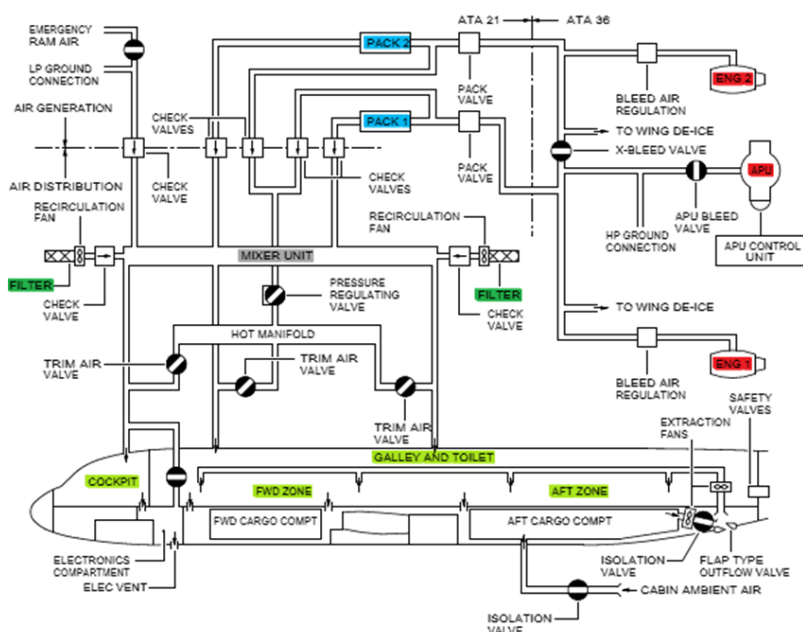
L'air de recirculation est filtré par des filtres HEPA sur toute la flotte ; les A330 sont également équipés de filtres COV (en cours d'installation sur les A320). En complément, sur les Longs Courriers (vols longs à haute altitude), des convertisseurs transforment l'ozone en oxygène.

Fonctionnement des systèmes de ventilation avec prélèvement d'air (moteur ou APU)

En vol le prélèvement d'air extérieur se fait à travers le moteur, au niveau du compresseur, au sol à travers l'unité auxiliaire de puissance (APU). L'air est ensuite conditionné en terme de température et de pression au niveau des packs (2 par avion), avant d'être mélangé à l'air de recirculation, préalablement filtré (filtre HEPA), puis est distribué dans la cabine. L'air est pressurisé à des altitudes de moyennes montagnes.

Circuit alimentation en air – A320

Sources de prélèvement : moteurs ou APU
Groupes de conditionnement d'air : Pack
Mixage de l'air d'alimentation : Mixer Unit
Filtre de recirculation : Filter
Zones de distribution avion



1 - L'air extérieur passe par les moteurs (ou l'APU), où il est compressé et prélevé

2 - L'air prélevé est régulé en température par les groupes de conditionnement d'air

3 - L'air qui entre en cabine provient à 50 % de l'air des moteurs, et à 50 % d'une recirculation de l'air cabine, après filtration

4 - A l'issue du mélange, l'air est distribué continuellement en cabine.

5 - L'air qui entre en permanence dans l'avion, est relâché en continu à l'extérieur au travers des Out Flow valves.

L'alimentation en air est identique pour tout l'avion, à l'exception de la cabine de pilotage qui est généralement alimentée par un seul pack et uniquement en air extérieur.

L'air arrive par le haut de la cabine, au niveau des compartiments à bagages et est récupéré en bas.

Les *galley* sont les zones de travail et de repos des PNC.

Le pilote peut moduler le taux de renouvellement de la cabine, mais pas le ratio air recyclé/air extérieur.

Evènements feu, fumée, odeurs (FFO)

Rapports des évènements

Les FFO sont répertoriés depuis 2018.

Les FFO sont signalés par l'équipage de trois manières :

- *L'aircraft technical logbook (ATL)* : par les PNT
- *L'aircraft cabin logbook (ACL)* : par les PNC
- *Pilot report*

Les ATL et ACL sont des documents formels (codifiés) qui répertorient les plaintes, auxquelles la maintenance doit répondre.

Le *pilot report* est un document plus informel, avec des textes libres où les équipages sont encouragés rapporter ce qui s'est passé dans le vol, avec plus de détails que sur l'ACL ou l'ATL.

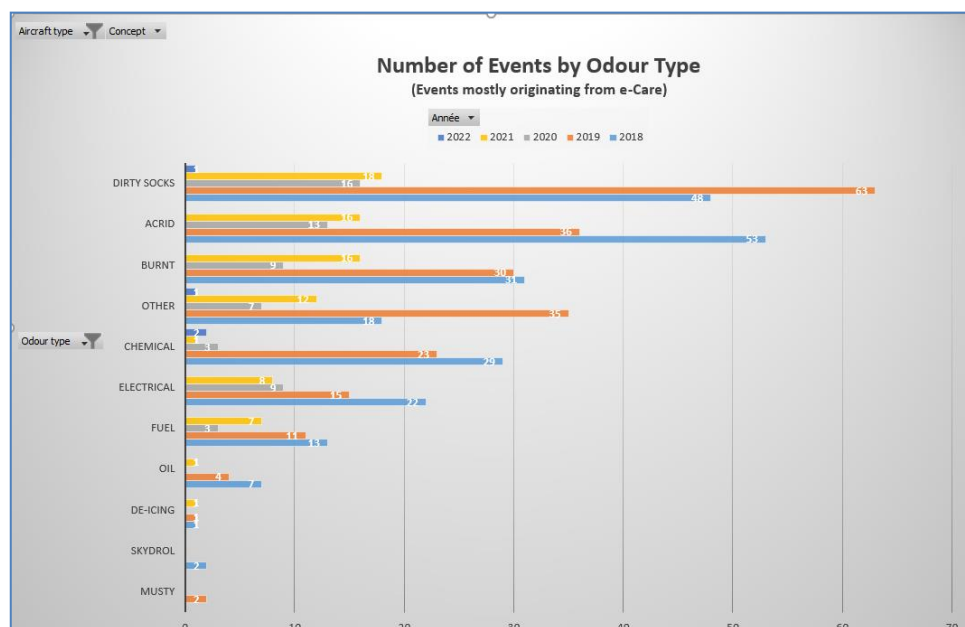
A noter, il peut y avoir des éléments dans l'ACL ou l'ATL et pas dans le *pilot report*, et vice versa. C'est pour cela que les services de maintenance croisent les informations des trois documents. Cependant toutes informations n'arrivent pas à la maintenance en même temps. Les ACL et ATL sont à l'attention de la maintenance, alors que le *pilot report* est à l'attention des opérations aériennes. Il peut mettre deux semaines à revenir au service de maintenance.

A l'issue de chaque vol, les plaintes dans les ACL et ATL sont traitées par le service de maintenance, qui doit apporter des réponses, sans quoi l'appareil ne peut être remis en service.

Nombres et types de FFO

Sur les années 2018-2019, la majorité des événements porte sur des odeurs, 727 sur 824 FFO. Les flottes les plus concernées en nombre FFO sont les vols moyens courrier (A320) et les B777 (à noter, le nombre de FFO n'est pas rapporté aux nombre de vols moyens courrier).

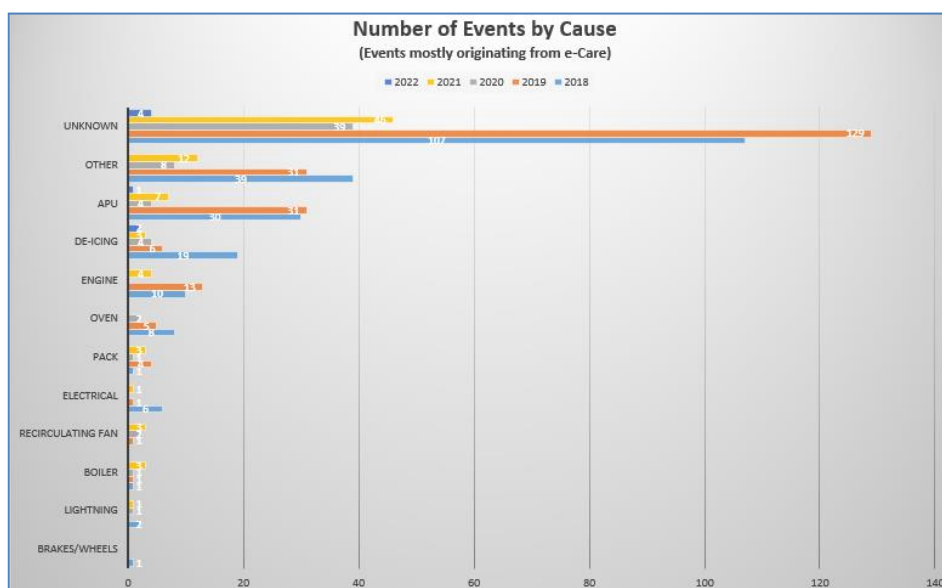
Le rapport de la typologie des odeurs est subjectif : principalement chaussettes mouillées, puis « acrid » (irritant/pique), brûlé, autre, chimique, électrique... Pour les équipages, les odeurs de chaussettes mouillées correspondent à des odeurs d'huiles moteurs brûlées, alors que les odeurs « acrid » correspondent à des fluides de dégivrage ou liquide hydraulique.



Recherche de la source des odeurs

La majorité des sources des odeurs n'est pas identifiée.

En termes de causes des odeurs identifiées, il y a une grande variété : échauffement d'un ventilateur de recirculation, défaut sur un ventilateur IFE, défaut sur les connecteurs de fours, surchauffe des douilles des néons toilettes ou cabine, surchauffe d'un circuit électrique, fuite d'huile APU dans le circuit de prélèvement d'air, humidité provenant du conditionnement d'air, équipements portables des passagers, pollution de l'air extérieur (survol d'usines ou d'incendies), odeur provenant du fret transporté dans la soute avant (fruits, légumes, animaux, ...), du dégivrage, etc.



Les odeurs de chaussettes mouillées sont observées essentiellement en vol, en fin de croisière/début de descente. Les échanges avec les constructeurs ne permettent pas à ce jour d'expliquer la cause. Une des hypothèses serait qu'au moment de la réduction du régime moteur certaines vannes commenceraient à bouger au niveau des packs qui fait que des contaminants qui seraient restés « cachés » pourraient revenir dans le circuit. Les constructeurs travaillent fortement sur le sujet, en collaborations avec les services de maintenance.

La source serait principalement l'APU et manière très exceptionnelle les moteurs. L'entrée d'air de l'APU serait contaminée lors des opérations de dégivrage ou par de micro-gouttelettes d'huiles (sur A320). Si ces composés arrivent jusqu'au pack, lors d'un phénomène non-caractérisé, lors de l'initiation de la descente, ces contaminants seraient remis en suspension et contamineraient la cabine.

Opération de maintenance

Maintenance Préventive

La détection de fuites est réalisée lors des inspections du programme d'entretien, avec des niveaux de détection différents suivant le type de visite:

- Lors des visites journalières : inspection du fuselage arrière permet de mettre en évidence des écoulements
- Lors de la vérification du niveau d'huile (périodicité variable suivant les avions)
- Suite à une plainte équipage mentionnant des odeurs et/ou fumées avec fourniture de la fiche de relevé *ad hoc*

Maintenance Curative

Les détections sont traitées par les techniciens en charge de la visite. Pour déterminer l'origine de la pollution, différentes inspections sont effectuées par celui-ci suivant la documentation constructeur :

- visuelles pour les fuites externes (potentiellement ingérées par l'APU par exemple)
- internes nécessitant des inspections endoscopiques et/ou des démontages pour accès, au niveau de moteur, pour voir s'il y a de fuites au niveau des roulements.

Dans le cas d'une plainte équipage, les phénomènes décrits ne sont pas toujours reproductibles au sol. La fiche de relevé remplie par les équipages est essentielle afin d'orienter au mieux la recherche de la source.

Procédure de décontamination

Le technicien procède à un essai / décontamination suivant la documentation constructeur afin de tenter de supprimer les odeurs générées, consistant à demander aux groupes de conditionnement d'air des températures élevées et basses afin de brûler le contaminant.

Dans les cas de pollution importante, des remplacements d'équipements peuvent s'avérer nécessaires (échangeurs, réchauffeurs, filtres etc.).

Concernant les gaines, les constructeurs ne prévoient pas de programme d'entretien. Cela peut être fait sur les grandes visites, tous les six ans. Mais il ne peut y avoir que de la poussière.

L'Anses mentionne une des hypothèses des « fumes events » qui serait une remise en suspension des dépôts dans les gaines. M. Groseille indique qu'il peut y avoir des dépôts entre le moteur et le pack. Les procédures de dépannage prévoient ce cas, qui intervient après la première étape de chauffage des packs, les conduits entre le moteur et les packs peuvent être déposés pour être inspectés puis nettoyés si nécessaire

La totalité des procédures de dépannage, suite à des odeurs, n'est pas nécessairement mis en œuvre après la première plainte, la récurrence est prise en compte ainsi que le lieu de la plainte (plus difficile à gérer en escale, par exemple). Néanmoins, en première instance la décontamination des packs est mise en œuvre afin de brûler les possibles traces de contaminants, puis l'avion est remis en exploitation. Les étapes suivantes d'investigation sont mises en œuvre s'il y a de nouvelles plaintes.

A noter, il est difficile de reproduire les odeurs lors des opérations de maintenance. Suite à des plaintes d'odeurs, les techniciens mettent en route l'APU, les moteurs, pour essayer de détecter les odeurs, mais dans la majorité des cas, ils ne sentent rien.

Ces problèmes d'odeurs sont difficiles à traiter mais pris au sérieux par Air France et les constructeurs.

Par exemple, suite à de nombreuses plaintes pour odeurs sur A320, après des opérations de dégivrage des avions, les enquêtes ont montré que du fluide de dégivrage pouvait entrer dans l'APU. Airbus a proposé une action corrective, avec l'installation de cornières afin de protéger la zone d'entrée d'air de l'APU et éviter que le liquide de dégivrage ne coule le long du fuselage, et soit ingéré.

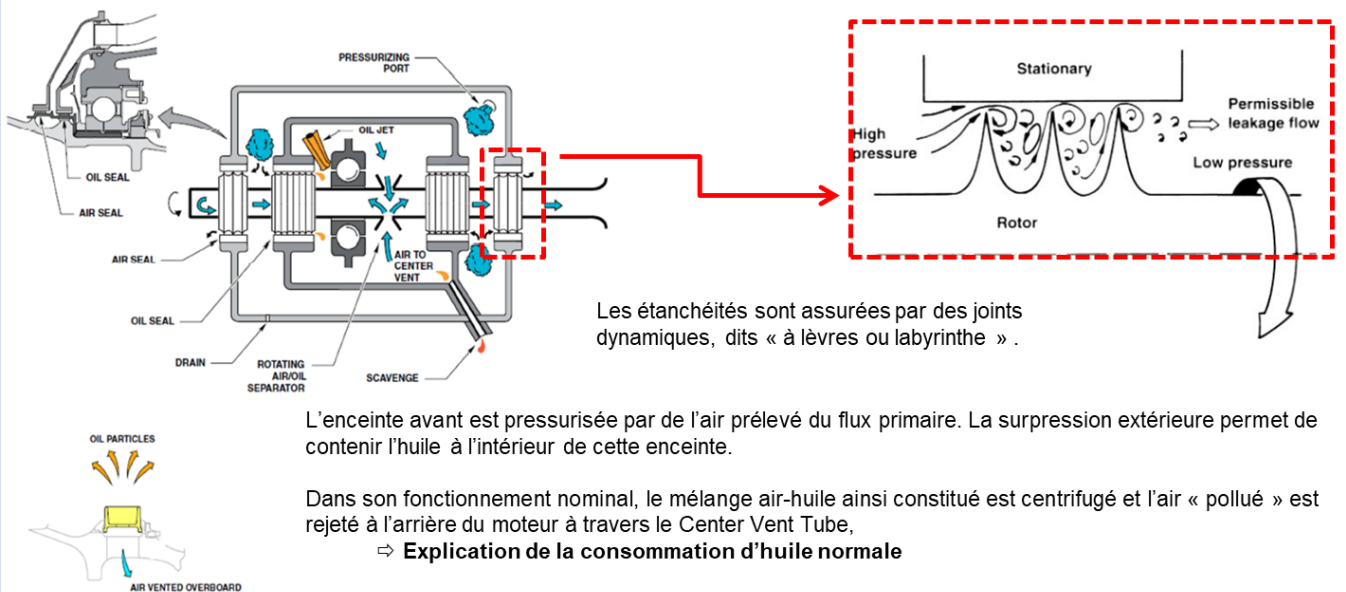
Il y a également l'installation en cours de filtre anti-COV.

Discussion sur la contamination via les moteurs

L'Anses demande des précisions sur l'absence de contamination possible par les moteurs soulignée par M. Groseille.

M. Groseille répond qu'il y a très peu de moteurs déposés pour raison de fuites d'huile. La micro-fuite chronique, en raison d'usures des paliers, est prise en compte techniquement par les motoristes. En fonctionnement nominal, l'huile n'est pas censée s'échapper, cela ne peut arriver que de manière accidentelle. Il y a deux enceintes autour du roulement lubrifié par l'huile. La deuxième enceinte est pressurisée de manière à empêcher l'huile de s'échapper de la première enceinte.

Enceinte de lubrification roulements - Avant



A noter, que les événements de « fume events » ayant pour origine le moteur ne dépendent pas du type avion mais de la motorisation de celui-ci (un A320, par exemple peut avoir une motorisation CFMI, Rolls-Royce ou Pratt & Whitney). D'après la littérature disponible sur les « fume events », de nombreux cas ont été recensés sur les moteurs Rolls Royce. Les technologies d'étanchéité des enceintes pouvant varier d'un motoriste à l'autre, il se peut que certains modèles de moteurs soient plus sujets aux « fumes events ». Si tel était le cas, des actions de modifications des moteurs concernés seraient sûrement prises par le motoriste.

Il y a peu de déposes de moteurs en raison de fuites d'huiles sur la flotte Air France (une pour l'année 2020) et les moteurs déposés pour d'autres raisons sont inspectés, notamment au niveau des joints, et à ce jour rien de particulier n'a pu être observé.

L'Anses demande s'il serait possible d'avoir des dépôts d'huiles dans les gaines aéraulique, puis un phénomène de remise en suspension. M. Groseille répond qu'il ne pense pas.

Il y a eu des événements de fumée en cabine suite à des lavages de l'intérieurs des moteurs pour nettoyer les ailettes. Initialement, ils étaient lavés avec un produit à base de savon qui arrivait à s'accumuler dans des coudes de tuyauteries de prélèvement d'air. Il y avait de vrais évènements de fumées visible dans la cabine.

L'Anses demande s'il y a déjà eu des inspections endoscopiques des gaines d'aération et des packs. M. Groseille répond que oui, suite à des problèmes de ventilation sur quelques A320, on s'est aperçu que dans certaines zones, il n'y avait pas d'air qui sortait des sortie d'air. La raison était que des plaques avec des micro-trous au niveau des sorties se bouchaient avec le temps. Il n'y avait pas d'encrassement particulier de l'intérieur des gaines.

[Documents transmis après l'audition](#)

- diaporama présenté lors de l'audition

Groupe de travail "Avion"**Compte-rendu de l'audition de la compagnie aérienne Corsair****12 septembre 2022**

Etaient présents pendant l'audition:

- M. Debugny, Mme de Quero, M. Reber, M. Mège – Corsair
- M. Barguil, M. Joubert – membres du groupe de travail (GT)
- Mme Malrat-Domenge – Anses

L'objectif de cette audition est de recueillir des informations sur :

- La gestion des incidents FFO dont plus particulièrement les contaminations de l'air alimentant la cabine (ces contaminations couvrent les « fume events » évoqués dans le cadre des causes du syndrome « dit » aérotoxique)
- La santé des personnels navigants

En amont de cette audition, un document présentant l'Anses, les objectifs des travaux d'expertise sur la "Qualité de l'air et les effets sanitaires chez les personnels navigants" et les objectifs de cette audition a été transmis à Mme de Quero.

Mme Corinne de Quero est personnel navigant commercial, élue au CSE (comité social et économique) et secrétaire de la CSSCT (commission santé, sécurité et conditions de travail).

M. Yann Reber est directeur technique.

M. Stéphane Mège est coordinateur support technique pour la direction technique

Xavier Debugny est coordinateur support technique pour la direction technique

Audrey Malrat-Domenge, coordinatrice de ces travaux d'expertise initie l'audition par un tour de table avant de présenter l'Anses, ainsi que le contexte et les objectifs des travaux d'expertise sur la "Qualité de l'air et les effets sanitaires chez les personnels navigants".

La parole est ensuite laissée aux représentants de la compagnie Corsair pour présenter l'historique de la problématique des « fume event » chez Corsair, les mesures mise en œuvre et apporter les réponses aux questions transmises en amont de l'audition par l'Anses. La présentation est ponctuée d'échanges avec le groupe de travail.

Historique de la prise en compte des *fume events* chez Corsair

La problématique des « fume events » est apparu chez Corsair en décembre 2018, lorsque suite à un appel d'un équipage, Mme de Quero, alors secrétaire du CHSCT, a émis un danger grave et imminent (DGI), suite à un *fume event* sur un Boeing 747. L'avion avait été mis au

sol à peu près 15 jours pour rechercher la source de la pollution. La problématique venait probablement d'un des quatre moteurs, en raison du vieillissement des joints d'étanchéité qui empêchent le l'huile de migrer vers le système de conditionnement d'air. Le moteur a été remplacé et il n'y a plus eu de signalement de *fume event* par la suite. Ces fuites de quelques gouttes d'huile sont perceptibles car très odorantes.

A noter, si c'était la première déclaration officielle de *fume event*, des personnels navigants avaient déjà fait l'expérience, sur ces Boeing, d'odeurs en cabine de type « chaussettes sales/mouillées », sans vraiment savoir ce que c'était. Des picotements à la gorge, aux yeux avaient été rapportés.

L'entreprise a alors mis en place des procédures de rapport des *fume events* et de prise en charge lorsque des salariés sont exposés.

Lorsque Corsair a commencé à changer sa flotte par des A330neo, le CHSCT a alerté l'entreprise sur le fait que ces appareils étaient connus pour des recrudescences de *fume events*. La procédure de *reporting* a été mise à jour, avec une procédure de reporting interne

- pour la direction technique dans le cadre des actions correctives techniques. Les personnels navigants doivent préciser les circonstances de l'évènement (moment, lieux dans l'avion...)
- pour les personnels navigants exposés. Cette procédure inclut notamment les modalités de déclaration à la médecine du travail, la mise en place de prises de sang pour mesurer les cholinestérases.

Depuis plusieurs réunions entre la direction et la CSSCT se sont tenues. La cellule du syndrome aérotoxique du SNPL, a été invité ainsi qu'un contrôleur de sécurité des risques professionnels à la CRAMIF. Ce dernier avait déjà suivi le premier DGI sur le Boeing 747. Lors des échanges avec la direction, il a rappelé l'obligation de l'employeur vis-à-vis de la protection des salariés, mais il n'avait pas l'expertise spécifique aux *fume events*. Il n'y a pas de travaux spécifiques sur ce sujet à la CRAMIF.

Suite ce DGI, il a été demandé à la direction une sensibilisation des personnels (PNC, PNT, mécaniciens), lors des maintiens de compétences. Aujourd'hui tous les incidents doivent être remontés à la CSSCT.

Aujourd'hui la flotte de Corsair est composée de 4 A330 et 5 A330neo. Les premiers A330neo neufs sont arrivés en avril 2021.

Système de reporting et traitement des incidents

Reporting

Le *reporting* des incidents en vol se fait par trois systèmes :

- *l'aircraft technical log* (compte-rendu matériel) : complété par le commandant de bord pour chaque vol. Y sont indiqués les heures de décollage et atterrissage, ainsi que toutes les défaillances techniques rencontrées pendant le vol. C'est le vecteur de communication classique entre les équipages techniques, la maintenance et la direction technique.
- le *cabin technical log* : le pendant de *l'aircraft technical log*, mais pour les équipages commerciaux
- *l'air safety report* : un rapport que peut émettre l'équipage de conduite. Ce rapport est également transmis aux autorités de l'aviation civile, car il porte sur la sécurité des vols.

Il est demandé aux équipages d'être le plus précis possible dans les rapports. Pour les *fume events*, il faut indiquer, par exemple, la phase de vol, le lieu dans la cabine, le mode de prélèvement d'air... Tous ces éléments vont servir à alimenter une matrice qui aidera à l'identification de la source.

Ensuite ces rapports sont transmis au « *maintenance control center* », organe de la direction technique de Corsair, qui centralise le *reporting* et déclenche les procédures de maintenance. Cette entité surveille 24h/24, 7j/7 les avions et peuvent être en contact avec les équipages de conduite.

En fonction des incidents déclarés, les équipes de mécaniciens prennent en charge l'avion soit en escale, soit à Orly dans la base principale. La réglementation veut que les équipes de mécaniciens répondent à toute remarque faite par l'équipage de conduite. Les procédures de maintenance sont déclenchées en accord avec les procédures d'Airbus.

Enfin, la dernière étape est l'analyse du phénomène et de ses causes et l'émission de recommandations, avec la prise en compte de l'historique des incidents.

A noter tous les avions de la flotte sont équipés de moteurs Rolls Royce, mais qui ne sont pas identiques. Il a 30 ans de technologies entre les deux types d'avions. Les A330 classiques sont équipés de Trent 700, tandis que les A330neo sont équipés Trent 7000.

Traitement des évènements

Suite à un évènement lors d'un vol, la direction technique, s'appuie sur les déclarations des personnels navigants pour analyser l'incident et mettre en œuvre les procédures écrites par Airbus pour traiter ces événements.

La déclaration d'un évènement entraîne des procédures de recherche de la cause et de maintenance, mais il y a de nombreux cas où l'inspection du moteur conformément aux procédures du constructeur ne permet pas de conclure sur l'origine.

En fait, lorsqu'il y a une contamination en huile qui provient de l'APU ou des moteurs, l'huile migre vers les packs, qui fonctionnent comme des frigos avec un cycle thermodynamique. Dans ce cycle, lorsque la température atteint un certain niveau, cela vient libérer les particules d'huile et les mettre en aval du circuit. Par ailleurs, lorsque l'avion traverse une zone humide, il peut y avoir des odeurs de type « chlore » émises en sortie des *ozone converters* (dispositifs placés en sortie des packs permettant de limiter la présence d'ozone en cabine).

Fume events

Fréquence

Depuis août 2021 jusqu'à ce jour, il y a eu 3029 vols, au cours desquels 92 *fume events* ont été déclarés (environ 3% des vols). Sur la période de l'été 2021 il avait 3 A330neo en service, les premiers évènements ont été déclarés en août. Et le dernier DGI a été fait en octobre.

Suite à la mise en place d'actions correctives, il n'y a pas eu d'incident en janvier- février 2022. De mars à mai 2022, une recrudescence des incidents a été observée avant une nouvelle décroissance en août, suite à d'autres actions correctives mises en place en juillet.

Pour les A330ceo (classique), il n'y a pas d'historique de *fume event* rapporté depuis 1999, sauf sur un appareil, qui produit des *fume events* depuis janvier 2022. La recherche de

causes, avec l'appui constructeur, Rolls Royce, a permis d'identifier le moteur 2 comme étant la source. Le changement de moteur est prévu.

Les phases de vols où les équipages détectent le plus de *fume events* sont lors de la montée et de la descente.

Facteurs contributifs

Ils peuvent émaner :

- du groupe de puissance auxiliaire (APU), petit moteur situé dans le cône à l'arrière de l'avion qui vise à distribuer de l'air
- des moteurs 1 (gauche) ou 2 (droite)
- d'une collision aviaire
- du système de conditionnement d'air. Il y a deux packs de climatisation dans les A330 qui récupèrent l'air de la cabine et extérieur (prélevé dans les moteurs) et qui le réchauffent, le compressent... pour *in fine* que l'air de la cabine soit pressurisé, à une température agréable et avec un bon taux d'humidité.
- d'une fuite hydraulique
- de liquide de dégivrage projeté sur les avions pour éviter la création de glace en hiver.
- d'une installation électrique, de câbles électriques qui sont défectueux qui provoquent des odeurs.

Le *reporting* demandé aux équipages a pour objectif d'identifier ces causes, d'où la nécessité de caractériser les odeurs, par exemple l'huile a souvent une odeur de « chaussettes mouillées ».

Chez Corsair les causes suivantes ont été constatées dans les A330neo :

- des compléments d'huile moteur trop importants : il y a un manque de fiabilité de l'indication du niveau d'huile 20 min après l'extinction du moteur, en raison de la migration de l'huile vers le bas du moteur. → Une procédure a été mise en place fin 2021 pour que les compléments d'huile moteur soient faits dans les 20 min maximum après l'extinction des moteurs. Une observation de baisse des *fume events* a suivi la mise en place de cette procédure.
- des ventilations moteurs ou des séquences de démarrage moteurs dépassant 40s (cumulées entre deux vols). La ventilation moteur, est une phase où le moteur est forcé de tourner « dans le vide » (à l'aide du démarreur) lorsque que le moteur n'est pas allumé. L'air est injecté sous pression, à l'aide de l'APU, pour pouvoir faire tourner le moteur. Si cette opération dure plus de 40 s, il peut y avoir des *fume events* sur le vol suivant, car l'air qui est dans les moteurs n'a pas été suffisamment pressurisé pour contenir l'huile qui est dans le moteur, ce qui entraîne une migration de l'huile dans le système de conditionnement d'air. → les procédures recommandent de ne pas dépasser ces 40 secondes. Si c'est le cas, une procédure d'assèchement des moteurs doit être déclenchée.
- Les lavages moteurs à l'eau : de l'eau est injectée sous pression. Cette opération est obligatoire et réalisée une fois par an environ, pour améliorer les performances du moteur. La problématique est similaire à la précédente, on oblige à faire tourner le moteur éteint, pendant environ 6 min, ce qui entraîne une migration de l'huile vers le système de conditionnement d'air.

Maintenance

Organisation

Corsair gère la majorité des opérations de maintenance avec ses mécaniciens. Seuls les très gros chantiers où les avions sont inspectés en profondeur sont externalisés.

Le suivi de navigabilité est fait, réglementairement, par les compagnies aériennes. C'est l'entité qui gère la navigabilité qui a une vision de l'état de santé de sa flotte. En fonction de cet état de santé et du programme de maintenance préventive, les opérations de maintenance sont commandées.

A noter, les centres de maintenance peuvent travailler sur de nombreux types d'avions avec des moteurs différents. Ils n'ont cependant pas de rôle d'alerte sur des problématiques qui pourraient être récurrentes sur certains modèles, ce sont des prestataires qui effectuent les travaux demandés par les compagnies aériennes, comme pourrait le faire un garagiste.

Procédures

Suite à des *fume events*, les trois procédures suivantes peuvent être appliquées en fonction de l'événement et dans un ordre bien particulier (prescrit par les constructeurs), car la source de l'odeur étant inconnue, il faut éviter de contaminer des parties du système qui peuvent être saines, ce qui aurait également pour conséquence de rendre plus difficile l'identification de la source.

- Assèchement/purge des moteurs au sol (Engine Ground, Purge) : faire tourner les moteurs à haut régime pendant 20 min minimum, afin que la température permette d'assécher les traces d'huile.
- Assèchement des conduits d'air localisés entre les moteurs et les packs : faire circuler de l'air chaud (> 200°C), qui provient des moteurs, entre les moteurs et les systèmes, afin d'assécher les traces d'huile
- Nettoyage du système de conditionnement d'air : mise en marche forcée des packs en plein chaud et plein froid sur une plage étendue de fonctionnement (situation qui ne se produit pas en mode de fonctionnement normal). L'air est fourni par l'APU.

L'assèchement des moteurs en vol est une autre procédure qui peut être appliquée. Pendant le décollage, les moteurs sont utilisés à pleine puissance. Les prélèvements d'air sont coupés, les moteurs n'alimentent donc plus la cabine en air, ce qui permet aux moteurs d'atteindre des températures plus élevées, afin d'assécher les traces d'huiles présentes dans le moteur. Cette procédure est appliquée au début d'un vol suivant un *fume events*, puis sur les deux vols suivants depuis juillet 2022. A noter cette procédure a été suspendue depuis mi-août 2022, car un des composants du moteur de l'A330neo présente des soucis de fiabilité qui a entraîné l'émission d'une consigne de navigabilité par l'EASA qui interdit l'utilisation de ces composants, et donc empêche la mise en œuvre de cette procédure. Les *fume events* ont augmenté sur août et septembre. Le remplacement des composants est prévu en septembre, ce qui permettra de nouveau d'appliquer la procédure.

A noter la mise en œuvre des procédures au sol est extrêmement longue, car si la procédure en elle-même dure 20 min, elle nécessite une aire spécifique, non disponible à Orly, c'est donc une piste qui doit être utilisée. Par ailleurs, le vent doit être dans la bonne direction. L'ensemble de la procédure dure 6 à 8 heures. Il n'est donc pas toujours possible de la faire juste après un *fume event*, c'est pour cela que la procédure en vol est plus adéquate et efficace.

Mesures à long terme

Un changement de logiciel de la gestion des packs modifie le cycle thermodynamique. L'objectif est de diminuer la température de l'air sortant des packs afin de limiter la diffusion des particules d'huile en aval du circuit.

Rolls-Royce prévoit d'apporter une modification dans le moteur visant à réduire la migration d'huile. La modification est validée sur banc d'essai et est aujourd'hui testée en vol. La certification est prévue début 2023. Pour faire cette modification, les moteurs doivent être déposés. Les premières modifications sur la flotte sont prévues fin 2023 lors des prochains passages en atelier.

Suivi des personnels navigants

Les personnels navigants de Corsair 710 PN (160 PNT et 550 PNC) sont suivis par la médecine du travail dans un centre médical inter-entreprise, non spécialisé dans le secteur aérien. Ils ont leurs visites médicales d'aptitude dans des centres agréés, conformément à la réglementation.

La CSSCT n'a pas de retour des dosages de cholinestérase des personnels navigants exposés à un *fume event*.

Documents transmis après l'audition

- diaporama présenté lors de l'audition
- procédure de Corsair à appliquer pour les *fume events*

Groupe de travail "Avion"**Compte-rendu de l'audition de l'Association des victimes du syndrome
aérottoxique (AVSA)****13 septembre 2022**

Etaient présents pendant l'audition:

- M. Pasqualini, M. Entemeyer (AVSA)
- M. Barguil, Mme Jargot, M. Joubert – membres du groupe de travail (GT)
- M. Bastos, Mme Malrat-Domenge, Mme Paillat– Anses

L'objectif de cette audition est de recueillir des informations sur :

- L'Avsa
- La population des personnels navigants en France:
- Incidents FFO
- Victimes du syndrome aérottoxique (Personnels navigants, Piste et Passagers)
-
- Les « fumes events » et le syndrome aérottoxique

En amont de cette audition, un document présentant l'Anses, les objectifs des travaux d'expertise sur la "Qualité de l'air et les effets sanitaires chez les personnels navigants" et les objectifs de cette audition a été transmis à M. Pasqualini.

Audrey Malrat Domange accueille les participants.

Tour de Table

Un tour de table est effectué en ouverture de la réunion afin que chaque participant puisse se présenter brièvement.

- Henri Bastos : adjoint du directeur de la direction de l'évaluation des risques (DER), responsable du domaine santé environnement santé travail, directeur scientifique santé travail
- Amandine Paillat : adjointe à la cheffe de l'unité d'évaluation des risques liés à l'air (UERA) de la DER
- Audrey Malrat Domange : coordinatrice d'expertise scientifique en charge du pilotage de l'expertise et de la coordination du groupe de travail.
- Stéphane Pasqualini : président de l'AVSA depuis 2 ans, personnel navigant commercial (PNC), chef de cabine à Air France. Elu CHSCT depuis 2015 et élu CSSCT Air France. Participe au comité technique TC 436 à l'Afnor pour établir une norme

- relative à la qualité de l'air en cabine. Membre du syndicat Union Générale des Ingénieurs, Cadres et Techniciens CGT (UGICT). Expérience de 22 ans d'aviation civile et a servi dans l'aéronautique navale embarquée (Porte-avion).
- Francis Entemeyer : membre de l'AVSA, participe à l'audition pour suppléer Monsieur Pasqualini sur les parties victimes, médicales et techniques. Expérience dans l'aviation depuis 1982 jusqu'en 2021. : 18 ans au sein de l'armée de l'air en tant qu'électronicien puis pilote de transport, puis 21 ans dans le transport civil : ATR puis Airbus en tant que pilote, commandant de bord, instructeur, etc. Participe à l'audition du jour en tant que membre de l'AVSA, mais est également membre du Syndicat national des pilotes de lignes (SNPL) : entre 2018 à 2020 membre d'un GT créé sur l'aérototoxicité qui avait conduit à la création d'une cellule syndrome aérottoxique dont l'objectif était d'apporter une aide aux adhérents du SNPL. Fait partie des victimes potentielles depuis fin 2016 : a été empêché de voler suite à série de symptômes et licencié par Airbus suite à une perte d'aptitude médicale.
 - Danièle Jargot : chimiste, membre du GT avion.
 - Olivier Joubert : maître de conférence toxicologue à l'université de Lorraine pharmacie. Interaction pollution de l'air et intoxications pulmonaires. Membre du GT avion et du comité d'experts spécialisé « évaluation des risques liés aux milieux aériens » (CES Air).
 - Yann Barguil : biologiste médical, toxicologue, pharmacien de formation. Responsable du laboratoire de biochimie, toxicologie et pharmacologie du Centre hospitalier territorial (CHT) Gaston Bourret en Nouvelle Calédonie. Membre du centre aéromédical center de Nouméa (ex CEMPN - Centre d'Expertise Médicale du Personnel Navigant). Membre du GT avion.

L'audition commence par une présentation de l'AVSA puis les divers points du guide d'entretien adressé aux participant en amont de la réunion sont déroulés.

Présentation de l'AVSA

L'AVSA regroupe toutes les personnes ayant une convergence sur ce dossier, essentiellement des victimes, navigants (pilote de ligne, PNC, parents de victimes), personnels de maintenance, personnels de piste, mais aussi des juristes, avocats, professionnels de santé, toxicologues.

L'AVSA a été fondée par le commandant de bord Eric Baillet le 15 mars 2016 suite à son expérience passée. Eric Baillet suite à un coma de 24h post vol a fait faire une expertise par de professeur Abou-Dounia qui lui a recommandé d'arrêter de voler. S. Pasqualini, à titre personnel, relate ses difficultés à cette époque, à pour faire reconnaître le sujet en interne à Air-France, les railleries subies de la médecine du travail et acharnements de l'encadrement à son encontre. Avec l'aide de l'association de toxicologie et de chimie de Paris, il a écrit un article pour vulgariser le sujet et le porter à la connaissance des navigants.

L'AVSA mentionne un manque d'information des équipages et des passagers, une mise à l'écart de salariés ayant évoqué ouvertement la problématique au sein de leur entreprise voire une violence psychologique envers ces salariés, une formation insuffisante des équipages sur cette problématique, un sous reporting des évènements FFO (feux-fumées-odeurs) par crainte de perte de licence, de mise à l'écart, de méconnaissance du problème.

L'AVSA relève également une décision de ne pas protéger les occupants de l'avion pour des raisons économiques et met en avant plusieurs qualificatifs juridiques : non-

assistance à personne en danger, non-respect de l'obligation de sécurité de l'employé par l'employeur Code de la sécurité sociale L452-1, non-respect de la convention de Varsovie – article 17, crime en bande organisée – article 132-71 du Code pénal.

L'AVSA a pour but de vulgariser la problématique du syndrome aérotoxique et la porter à la connaissance des navigants. L'association tente de pallier, bénévolement, tous ces manquements graves, et apporte de la documentation et des informations aux victimes. Depuis sa création l'AVSA voit le nombre de personnes travaillant avec elle augmenter.

En réponse à la question de l'Anses, L'AVSA ne souhaite pas préciser le nombre de ses adhérents d'une part car certains ont peur d'être démasqués par leur entreprise et d'autre part plusieurs personnes les sollicitent sans adhérer à l'association. L'AVSA rappelle que la difficulté réside dans le fait qu'officiellement, le syndrome aérotoxique n'existe pas.

Echanges sur le questionnaire transmis en amont de l'audition

La population des personnels navigants en France:

- *Nombres de personnels navigants en exercice en France*
- *Statistiques sur l'âge, sexe...*

L'AVSA ne dispose pas de données ni statistiques relatives aux personnels navigants. Elle suggère de se rapprocher de la Caisse de retraite des personnels navigants (CRPN).

Incidents FFO

- *Nombre d'incidents rapportés dans officiellement ou officieusement*

L'AVSA relève un manque de transparence sur le sujet et un sous-reporting. Les données disponibles ne sont donc pas fiables.

Des précisions sont apportées sur la terminologie FFO (feux-fumées-odeurs) : d'un point de vue technique, un FFO n'existe pas. Cet acronyme est utilisé par les compagnies aériennes pour regrouper différents événements, notamment à visée d'utilisation dans les nombreux comptes rendus et check-lists que doivent remplir les commandants de bord. D'un point de vue juridique sont reconnus l'existence de feux (fire), de fumées d'incendies (fire smoke) et d'émanations toxiques (fume)²⁶, mais pas l'existence d'odeurs. Officiellement c'est « Fire, smoke et fume ».

L'ambiguïté en français du smoke et du fume est relevée. Le terme fume a été initialement traduit par fumées alors qu'il signifie émanation. Ceci a eu pour conséquence que le personnel, lors des exercices de simulation, ne complétait pas la check-list correcte. L'AVSA rapporte qu'entre 2004 et 2006 une première checklist « fume event » avait été établie, mais qu'elle n'existe plus. Dans les compagnies aériennes actuelles, il y a très peu de formation/instruction sur cette problématique. Dans les journées de formations des circuits d'entraînement suivies par les personnels navigants commerciaux, parmi les nombreux modules d'entraînements sécurité (feux, fumées, sauts dans les toboggans, évacuation en catastrophe ...), trois boîtes à odeur sont utilisées pour entraîner l'équipage à reconnaître certaines odeurs qui pourraient être dues à des problèmes de contamination de l'air. Le temps consacré à ces boîtes à odeurs au cours de ces formations est très court. L'AVSA souligne que ces boîtes ne sont pas suffisantes pour permettre d'appréhender réellement la problématique. En effet, un équipage peut

²⁶ Complément apporté en relecture du compte rendu par les auditionnés : (équivalent vieux français : fumet)

monter à bord d'un avion dans lequel il y a eu un fume event sur le vol précédent et dans lequel il n'y a aucune odeur mais cet avion est rempli d'émanations toxiques qui ne sont pas perceptibles par cet équipage. L'équipage peut voler 4 vols d'affilée sur une journée (11h30 de service en vol) et respirer cet air contaminé. L'AVSA mentionne également que cet air pressurise la cuve à eau en soute, et par conséquent les toxiques présents dans l'air vont se retrouver dans l'eau utilisée pour préparer les cafés et des thés.

L'AVSA relève que malgré la circulaire émise par l'OACI en 2015 (Cir 344-AN/202), et l'existence d'alertes de la part des autorités américaines de l'aviation civile (SAFO de la FAA et régulation 28 de la CAA), et de l'autorité asiatique, l'autorité européenne, l'EASA, n'a pas émis de consignes/directives.

Certaines compagnies suite à des compte rendus et alertes de commandant de bord ont ouvert des enquêtes Air France a ainsi intégré dans son DURP le risque de l'expositions à de l'air contaminé à bord de l'avion.

L'AVSA souligne un déni de la part des instances médicales, notamment française (Pôle médical et conseil médical de l'aviation civile) qui réfutent totalement l'existence du syndrome aérotoxique car ce syndrome n'existe pas officiellement. Elle dénonce l'absence d'analyse des conséquences d'une exposition à de l'air contaminé dans les avions.

Victimes du syndrome aérotoxique

- *Nombre de victimes en France et à l'étranger*
- *Symptômes rapportés par ces victimes*
- *Nombre de pertes d'aptitudes temporaires ou définitives en lien avec des pathologies qui pourraient être liées au syndrome aérotoxique*
- *Prises en charge des victimes : existe-t-il des protocoles officiels ou non sur la prise en charge médicale de PN se disant victimes du syndrome aérotoxique, par la médecine du travail, les compagnies aériennes, autorités compétentes...*

Nombre de victimes en France et à l'étranger

Concernant le nombre de victimes, l'AVSA souligne qu'il est difficile d'avoir des informations précises. La problématique de l'aérototoxicité est arrivée en France en 2015/2016, mais celle était connue bien avant chez les anglo-saxons, notamment les australiens qui ont eu beaucoup de problèmes sur un avion appelé le BAE 146.

Pour donner un ordre de grandeur de la population, l'Avsa fait référence à une publication de 2015 ou 2018 qui mentionnerait 500 000 personnels navigants dans le monde et 3,5 milliards de passagers. Elle ajoute que la CRPN fournit des informations sur son site internet, et qu'en 2018 il y avait environ 34000 actifs et 28000 retraités.

L'AVSA mentionne qu'elle n'est pas en capacité de gérer ce type d'informations et données statistiques. Les réponses à ces questions devraient pouvoir être obtenues auprès des instances officielles : CRPN, DGAC, bureau des licences, DSAC, pôle médical de la DGAC, Conseil médical de l'aviation civile (CMAC), BEA, etc. D'autant plus qu'il existe une classification des événements (incidents et accidents), et que ceux-ci doivent être quantifiés quelque part.

L'AVSA mentionne également que le GCAQE (*Global Cabin Air Quality Executive*), organisme anglais qui s'intéresse à la problématique de la contamination de l'air des cabines et rassemble les informations disponibles au niveau mondial sur l'aérototoxicité, a émis en 2017 une brochure qui permet d'avoir quelques données.

L'Avsa a identifié une étude faite par la Soframas (Société francophone de médecine aérospatiale) qui parlait de 600 personnels navigants commerciaux d'Air France exposés. Le docteur Klerlein avait traité le sujet. S. Pasqualini précise qu'il n'a pas eu accès à cette étude malgré une demande au titre du CHSCT.

Symptômes rapportés

L'AVSA liste les symptômes qui sont rapportés par les victimes.

Parmi les symptômes, ceux qui reviennent très souvent : la fatigue chronique et la fatigabilité, problème de sommeil, d'insomnie sévère, d'apnée du sommeil, des problèmes pulmonaires ou cardio pulmonaire, d'essoufflement, de souffle court, des maux de têtes, épuisement, troubles ORL, troubles gastro intestinaux (ballonnement, maux d'estomac, diarrhées) le lendemain des vols, douleurs aux jambes : jambes sans repos, problèmes neurologiques soit neuropathiques soit neurocentraux: difficulté d'élocution, difficulté à trouver des mots, altération de la mémoire, sensation d'avoir 15/20 ans de plus, problèmes de mémoire à court terme, de mémoire anté-rétrograde, des douleurs musculaires ou articulaires, des tremblements au niveau de certains muscles, incontinence urinaire épisodique, transpiration, équilibre, émotivité irritabilité, rhinite perfusante, allergie, sinusite, etc.

L'Avsa mentionne une toxicologue anglaise Sarah Myhill qui avait établi 3 classes de symptômes : 1- liés à fatigue chronique, 2 -le MCS²⁷ – non reconnu en France mais reconnu par l'OMS - 3 neuropsychologues (changement personnalité, humeur variable, hypersensibilité, symptômes dépressifs...).

Symptômes associés : symptômes organiques (pulmonaires (angine de poitrine, souffle court, douleurs...), le fait d'« attraper tout ce qui passe »).

D'autres symptômes ou pathologies sont remontés : problèmes rénaux, endocrinaux, de fertilité, de fausses couches, cardiaque : (arythmie, extrasystole, hyper tension...), maladies qui se déclenchent précocement : AVC, infarctus, maladies neurodégénératives (Alzheimer, maladie de Charcot, Parkinson...), diabète type II, tumeurs cérébrales, cancers...

Pour finir : problèmes d'asthénie, céphalée, vertiges, tremblements des extrémités, irritabilité, trouble de la concentration, troubles du Sommeil, trouble de la mémoire, de l'efficacité intellectuelle, neuropathies périphériques, encéphalopathies, problèmes aux yeux, d'épisclérite, beaucoup de problèmes auto-immuns, rhinite, asthme, dyspnée, atteinte hépatique et rénale

Concernant les femmes, l'AVSA remonte des problèmes de fausses couches fréquentes et le nombre important de FIV à laquelle ont recours les hôtesses. Des études chinoises montreraient que ces problèmes sont liés aux organophosphorés.

L'AVSA souligne que parmi tous ces symptômes il est difficile de savoir ce qui est directement la conséquence de l'exposition et des répercussions sanitaires en cascade. L'association demande, face à l'âge moyen des victimes, que des études épidémiologiques soient conduites pour pouvoir répondre à la question de la problématique de l'air contaminé.

²⁷ Précision apportée à la relecture du compte rendu par l'Anses : hypersensibilité chimique multiple ou MCS en anglais (*Multiple Chemical Sensitivity*)

L'AVSA dit avoir croisé tous les dossiers de façon anonymisée et ce qui ressort souvent sont des problèmes pulmonaires et des problèmes cérébraux avec de l'imagerie à suivre. Elle note que le PETscan arrive souvent très tard par rapport au début des investigations. L'AVSA cite les travaux d'Abou Donia montrant que les auto-anticorps et biomarqueurs démontrent catégoriquement une atteinte du système nerveux central voire périphérique de l'individu.

L'association déplore le manque de connaissance du sujet de la part des médecins, qu'il s'agisse de médecins généralistes, de médecins du travail ou de spécialistes, et souligne la nécessité pour le GT émergence du RNV3P de se saisir du sujet. Elle déplore également le manque de connaissance du RNV3P par les médecins, ainsi que des postures personnelles anti syndrome aérotoxique de certains praticiens.

L'Anses confirme qu'une extraction des cas de la base de données du RNV3P est effectuée dans le cadre de l'expertise. Elle rappelle le processus de consultation des CCPPE et l'évaluation de l'imputabilité faite par les médecins experts reposant sur l'examen clinique, le curriculum laboris et sur les données de la littérature.

Prises en charge des victimes :

L'AVSA affirme qu'hormis une prise en charge administrative, il n'existe pas de prise en charge médicale des victimes en France contrairement en Allemagne.

A une demande de précision sur la prise en charge en Allemagne, l'AVSA répond qu'il semblerait qu'en Allemagne il y aurait une prise en charge des soins par la compagnie aérienne nationale, voire des solutions médicales pour l'amélioration de l'évacuation des toxines. L'AVSA doit se rapprocher prochainement de leurs contacts pour en savoir plus, car elle ne dispose pas de plus d'information à l'heure actuelle.

L'AVSA déplore le comportement de certains praticiens niant totalement la problématique et recourant à des pratiques visant à décourager les personnes de consulter.

L'AVSA rappelle qu'elle place beaucoup d'espoir dans l'étude conduite par l'Anses et émet deux souhaits : une étude épidémiologique pour savoir de manière définitive s'il y a une problématique avec les personnels navigants/piste/passagers et que les victimes soient prises en charge.

En complément, l'AVSA attire l'attention sur des modifications de technologies pouvant voir un impact sur la contamination de l'air des cabines :

- les températures des réacteurs sont beaucoup plus élevées que par le passé (350-400°C contre 800-900°C à l'heure actuelle), ce qui impacte la toxicité des polluants émis,
- une diminution de la fréquence d'ouverture de moteur,
- la consommation d'huile est un paramètre de suivi des réacteurs, l'huile est ajoutée à chaque rotation.

Aucunes questions de la part des experts lors de cette audition de l'AVSA.

Fin de l'audition

Annexe 6. Consultation internationale : organismes

Allemagne	<i>Ministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur</i>
Allemagne	<i>Luftfahrt-Bundesamt (LBA)</i>
Australie	<i>Civile Aviation Safety Authority (CASA)</i>
Autriche	<i>Federal Ministry of Transport, Innovation and Technology (BMVIT)</i>
Autriche	<i>Austro Control GmbH (ACG)</i>
Belgique	Service Public Federal Mobilité et Transports - Direction Generale Transport Aérien5
Bulgarie	<i>Civil Aviation Administration</i>
Canada	L'autorité de l'aviation civile du Canada
Chypre	<i>Ministry of Communications and Works</i>
Coratie	<i>Croatian Civil Aviation Agency</i>
Danemark	<i>Danish Transport Authority</i>
Espagne	<i>Agencia Española de Seguridad Aérea</i>
Estonie	<i>Ministry of Economic Affairs and Communications</i>
Estonie	<i>Civil Aviation Authority</i>
Etats-Unis	<i>Federal Aviation Administration</i>
Finlande	<i>Finnish Transport Safety Agency</i>
Grèce	<i>Hellenic Civil Aviation Authority</i>
Hongrie	<i>National Transport Authority Hungar</i>
International	Organisation Aviation Civile International (OACI)
International	Agence européenne de la sécurité aérienne (easa)
International	Association du transport aérien international (IATA)
Irlande	<i>Irish Aviation Authority</i>
Islande	<i>Icelandic Transport Authority</i>
Italie	<i>Ente Nazionale per l'Aviazione Civile</i>
Lettonie	<i>Civilās aviācijas aģentūra</i>
Liechtenstein	<i>Landesverwaltung Liechtenstein</i>
Lituanie	<i>Civil Aviation Administration</i>
Luxembourg	Direction de l'Aviation Civile du Luxembourg,
Malte	<i>Transport Malta, Civil Aviation Directorate</i>
Norvège	<i>Luftfartstilsynet - Civil Aviation Authority Norway</i>
Nouvelle-Zélande	<i>Civil Aviation Authority</i>
Pays-Bas	<i>Inspectie Leefomgeving en Transport,</i>
Pologne	<i>Civil Aviation Authority</i>
Pologne	<i>Ministry of Transport</i>
Portugal	<i>Instituto Nacional de Aviação Civil</i>
Roumanie	<i>Romanian civil aeronautical authority</i>
Slovénie	<i>Ministry of Transport</i>
Slovénie	<i>Civil Aviation Authority</i>
Suède	<i>Transportstyrelsen</i>
Suisse	<i>Federal Office of Civil Aviation</i>
Tchéquie	<i>Ministry of Transport, Civil Aviation Authority</i>

Annexe 7. Consultation internationale : questionnaire

Consultation internationale sur les recommandations institutionnelles existantes sur les moyens d'action ou de prévention visant à améliorer la qualité de l'air dans les cabines²⁸ d'avions

L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) est un établissement public à caractère administratif placé sous la tutelle des ministères chargés de la Santé, de l'Agriculture, de l'Environnement, du Travail et de la Consommation. L'Anses assure des missions de veille, d'expertise, de recherche et de référence sur un large champ couvrant la santé humaine, la santé et le bien-être animal ainsi que la santé végétale. Suite à une saisine de syndicat membre de son conseil d'administration, l'Anses travaille actuellement sur la qualité de l'air dans les cabines d'avion et effets sanitaires chez le personnel navigant.

Ces travaux s'inscrivent dans un contexte d'inquiétudes remontées par plusieurs syndicats sur la contamination l'air intérieur supposée des avions via le système d'alimentation en air de la cabine et ses effets potentiels sur la santé, notamment le « syndrome aérotoxique ».

Trois axes de travail ont été retenus pour ces travaux d'expertise :

1. Etat des connaissances sur la pollution chimique de l'air dans les cabines d'avions :

- Données de concentrations disponibles,
- Identification des sources d'émissions des polluants caractéristiques des cabines d'avions,
- Description du cas particulier des « fumes events »,
- Facteurs influant la contamination chimique des cabines en fonction des phases et modes opératoires de vols.

2. Etat des connaissances des effets sur la santé chez le personnel navigant :

- Analyse des données épidémiologiques sur les facteurs de risques sur la santé des personnels navigants,
- Analyse des données relatives au « syndrome aérotoxique »,
- Identification de populations sensibles.

3. Etat des lieux des recommandations institutionnelles existantes sur les moyens d'action ou de prévention.

Dans ce contexte, l'Anses réalise une consultation internationale afin de recueillir des informations sur les recommandations institutionnelles existantes sur les moyens d'action ou de prévention visant à améliorer la qualité de l'air dans les avions, particulièrement concernant les événements de contamination de l'air de la cabine (CAC) dont les contaminations par des polluants physico-chimiques issus du système d'alimentation en air de la cabine.

²⁸ Le terme de « cabine » dans ce document inclut la cabine des passagers et le poste de pilotage.

Considérant les domaines d'expertise de votre agence, nous vous contactons, aujourd'hui, afin de recueillir toute information dont vous auriez connaissance sur les questions suivantes.

Gestion des évènements de contamination de l'air de la cabine

- Réglementations ou recommandations sur des limites / valeurs guides pour certains polluants physicochimiques de la qualité de l'air dans les avions.
- Données annuelles sur le nombre et l'origine des évènements de contaminations de l'air de la cabine dont celles issues du système d'alimentation en air de la cabine rapportés.
- Procédures à mettre immédiatement en œuvre en cas de détection pendant le vol d'une contamination pouvant être issue du système d'alimentation en air de la cabine.
- Procédures de suivi de ces évènements après l'atterrissage (reporting, recherche de la cause, maintenance...).
- Moyens mis en place pour améliorer la qualité de l'air dont ceux pour prévenir ces contaminations de l'air de la cabine *via* le système d'alimentation en air.
- Travaux en cours sur cette problématique de qualité de l'air dans les avions.

Gestion du suivi de la santé des personnels navigants suite à un évènement de contamination de l'air de la cabine.

- Rapport d'effets sanitaires des personnels navigants ou passagers en lien avec ces contaminations de l'air de la cabine, notamment *via* le système d'alimentation en air
- Gestion médicale des personnels navigants se disant victimes du « syndrome aérotoxique » (diagnostic, parcours de soin, reconnaissance de maladies professionnelles ...).

Le rapport d'expertise collective, incluant les résultats de cette consultation internationale sera disponible sur notre site internet. Si vous le souhaitez, nous pourrions partager avec vous les résultats collectés lors de cette consultation.

Votre agence pourrait ne pas pouvoir donner des éléments de réponses à toutes ces questions, tout élément de réponse sur les questions mentionnées ci-dessus, ou sur les autres axes de l'expertise, sera le bienvenu, ainsi que la suggestion, le cas échéant, de contacts auprès d'autres instituts.

Nous vous serions reconnaissants d'une réponse si possible avant le 20 juillet 2022.

Merci d'envoyer vos réponses à Mme Audrey Malrat-Domenge, Audrey.malrat-domenge@anses.fr.

N'hésitez pas à nous contacter pour tout complément d'information.

Annexe 8. Éléments issus du projet FACTS

Tableau 23 : Spécificité de l'exposition des personnels navigants (D'après)

Exposition	Spécificité de l'exposition des personnels navigants
Pression atmosphérique	<i>a minima</i> 75,3 kPa (environ équivalent à 2438 m). En général, pression en cabine supérieur à 80 kPa d'autant plus pour les nouveaux modèles d'avions qui augmentent la pression en cabine pour des raisons de confort
Flux d'air	>0,28 m ³ /min par personnel navigant (réglementation CS 25,831). Flux observé : ≈ 20 par heure
Humidité	En moyenne 10 à 20%, avec une gamme comprise entre 2 et 77 %
Température	Entre 19 et 35 °C
Niveau d'oxygène	La pression atmosphérique plus faible en cabine réduit la quantité d'oxygène dans le sang (saturation) de 4 à 5 % ; la saturation en oxygène ne descend généralement pas en dessous de 90 %. Cela équivaut ~15% d'oxygène dans des conditions normobariques.
Aérosols biologiques	les agents biologiques viennent principalement des passagers et équipages
Aérosols « produits de combustion	Les « fume events » peuvent contenir des fumées de combustion provenant de différentes sources
Changement de régime jour/nuit	Lorsque l'on voyage vers le nord ou vers le sud sans changer de fuseau horaire l'intensité lumineuse, ainsi que la quantité de lumière du jour varient
Position sédentaire (immobilisation)	
Responsabilité	Du fait de la haute responsabilité directe qui pèse sur les PNT, l'incapacité ou la réduction de la capacité mentale ont de graves conséquences.
Bruit	entre 75-80 dB dans le cockpit dans une récente étude sur 9 modèles d'avions. entre 84 à 88 dB en incluant les communications via le casque entre 75 et 81 dB dans la cabine d'avion dans une autre étude sur 6 modèles d'avions.
Vibration	Pas de données identifiées. Vibrations en vol liés à la conception de l'avion. Augmentation en cas de turbulences.
Radiation	de 0 à 5 mSv/an

Tableau : Mesures réalisées lors de la phase test 1 (FACTS)

Composés gazeux et particulaires	Temps réel	différé	cabine	cockpit
particules (PM)			X	-
particules ultrafines (PUF)	Distribution granulométrique		X	

PUF PUF	Concentration en nombre		X	X
		Caractérisation chimique	X	-
Carbone suie			X	X
Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)/ Polychlorobiphényles (PCB)		X	X	X
Organophosphates (OP)		X	X	X (vol test)
Composés carbonylés		X	X	X
Composés organiques volatils (COV)		texax	X	X (vol test)
Amines		X	X	-
Composés organiques volatils totaux (COVT)	PID		X	-
	E-Nose (capteur metal-oxide)		X	
Multipolluants	aerotracer		X	-
Dioxine/furanes (PCDD-PCDF)			X	-
Monoxyde de carbone (CO)	X			X
Dioxyde de carbone (CO ₂)	X			X
Ozone (O ₃)	X			
Dioxyde de soufre (SO ₂)				X
pression, température (P, T)	X		X	X

Tableau : Mesures réalisées lors de la phase test 2 (FACTS)

Composés gazeux et particulaires	Temps réel	Différé	cabine	cockpit
PUF	Distribution granulométriques (EEPS 3090 (5,6 - 560 nm), Partector 2 (10 - 300 nm)) nombre total		X	-
PM	MiniWRAS (Diffusion optique de la lumière, spectromètre de mobilité électrique, 10 nm – 35µm)		X	-

BC	Micro Aethalomètre		X	X
Multipolluant	Aerotracer, GDA (réseau de capteurs hybrides comprenant un spectromètre de mobilité ionique (SMI))		X	X (aerotracer)
	Raid-M (SMI)		X	
COVT	PTR-TOF		X	-
COV		tenax	X	X
COV très volatils		X		
Composés carbonylés		X	X	X
Organophosphates				
GC_Olf				
T			X	X
P			X	X

Annexe 9. Rapport du Réseau national de vigilance des pathologies professionnelles

Base de données du RNV3P :

Extraction et analyse des Pathologies en Relation avec le Travail chez le personnel navigant du secteur aérien

Description de la demande

Description des données du RNV3P concernant les Pathologies en Relation avec le Travail (PRT) chez le personnel navigant du secteur aérien

Demandeur

A. MALRAT-DOMENGE - UERA - Pilote du GT « Qualité de l'air dans les avions »

Réponse établie au nom du RNV3P

E. OUGIER - DAVS RNV3P (eva.ougier@anses.fr)

Expert rapporteur

JC. PAIRON - CCPPE CHI Créteil

Contributions

L. LARABI - CHU Grenoble

S. FAYE - DAVS

J. BLOCH - DAVS

Mai 2023

SOMMAIRE

1	Contexte de la demande.....	266
2	Présentation du Réseau national de vigilance et de prévention des pathologies professionnelles (RNV3P).....	267
2.1	Contexte et objectifs	267
2.2	Données	267
2.3	Codage des données au sein du RNV3P.....	268
2.4	Mémo clinique	268
2.5	Type de conclusion possible d'un problème de santé dans le cadre de l'activité de diagnostic.....	269
3	Protocole d'extraction des données du RNV3P en réponse à la saisine	270
3.1	Objectif de l'extraction	270
3.2	Méthodologie et critères d'extraction.....	270
3.2.1	Démarche pour identifier les PRT chez le personnel navigant du secteur aérien ..	270
3.2.2	Démarche d'identification des PRT évoquant un lien possible avec des expositions dans l'air intérieur de cabine d'avion dans leur dossier.....	272
4	Résultats de l'extraction	274
4.1	Description générale des PRT concernant du personnel navigant du transport aérien depuis 2001.....	274
4.1.1	Évolution du nombre de PRT diagnostiquées entre 2001 et 2021.....	274
4.1.2	Caractéristiques démographiques des PRT	274
4.1.3	Postes de travail et secteurs d'activité associés	275
4.1.4	Pathologie principale diagnostiquée	275
4.2	Expositions et niveaux d'imputabilité des PRT concernant le personnel navigant du transport aérien	279
4.3	PRT mentionnant des manifestations cliniques possiblement en lien avec des expositions dans l'air intérieur de cabine d'avion	283
4.3.1	Évolution du nombre de PRT évoquant des manifestations cliniques possiblement en lien avec des expositions dans l'air pressurisé de cabine d'avion entre 2001 et 2021 et CCPPE rapporteurs.....	283
4.3.2	Description des 20 PRT mentionnant des manifestations cliniques possiblement en lien avec des expositions dans l'air intérieur d'une cabine d'avion.....	284
4.3.3	Expositions et niveaux d'imputabilité au moins faible des PRT mentionnant des manifestations cliniques possiblement en lien avec des expositions dans l'air intérieur d'une cabine d'avion	286
4.3.4	Analyse des problèmes de santé concluant à une absence d'imputabilité des expositions dans l'air intérieur d'une cabine d'avion	287

5	Discussion	289
7	Contexte, objet et modalités de réalisation de l'étude	299
7.1	Contexte et objectifs	299
7.2	Modalités de réalisation des travaux : moyens mis en œuvre et organisation	299
7.3	Prévention des risques de conflits d'intérêts	299
8	Matériel et méthodes	300
8.1	Schéma et période de l'étude	300
8.2	Source de données : le système d'information des Centres antipoison (SICAP)...	300
8.2.1	Base des agents	300
8.2.2	Base des cas	300
8.3	Définition et sélection des cas et événements d'intérêt	301
8.4	Méthodes d'évaluation des cas	302
8.4.1	Imputabilité	302
8.4.2	Gravité	302
8.4.3	Grille de relecture des cas	302
9	Résultats	303
9.1	Analyse des événements	303
9.1.1	Évolution temporelle	303
9.1.2	Description des événements	303
9.1.3	Endroit de l'avion	304
9.1.4	Phase de vol	304
9.1.5	Analyses de qualité de l'air de l'avion	305
9.2	Analyse des cas	305
9.2.1	Âge et sex-ratio	305
9.2.2	Type de personnes	305
9.2.3	Description des symptômes	306
10	Discussion	308
11	Conclusion	310
12	Bibliographie	311

Synthèse

Dans le cadre de la saisine de l'Anses relative à la qualité de l'air dans les avions et à ses conséquences sur la santé, une étude de toxicovigilance a été réalisée à partir des cas rapportés aux centres antipoison (CAP) entre le 1^{er} janvier 2000 et le 31 décembre 2021. Les événements d'intérêt correspondaient à des situations où une ou plusieurs personnes avaient

rapporté une odeur inhabituelle ou manifesté des symptômes, ressentis comme étant en lien avec une altération de la qualité de l'air de l'avion.

Sur cette période d'étude, 66 évènements ont été identifiés. L'évolution annuelle a montré une augmentation des évènements rapportés aux CAP à partir de 2014 jusqu'en 2019, puis une diminution en 2020 et 2021. L'évènement était décrit par la perception d'une odeur inhabituelle dans presque un évènement sur deux (47,0 %), de « vapeur/gaz » (24,2 %) ou de fumée (19,7 %). Lorsque l'information était connue (80,6 %), l'odeur perçue était décrite majoritairement comme une odeur de « chaussettes mouillées » (8 évènements), de « kérosène » (4 évènements) et d'« huile de moteur » (4 évènements). Les endroits de l'avion où se situait la personne lors de la perception de l'évènement étaient le plus souvent le cockpit (33,3 %) ou la cabine (30,3 %). L'évènement pouvait être perçu à plusieurs moments d'un même vol (27,3 %) ou uniquement pendant une phase du vol : la croisière (19,7 %), moins souvent l'atterrissage (12,1 %) et le décollage (4,5 %). Quelle que fût l'endroit de l'avion ou la phase de vol, des odeurs inhabituelles étaient le plus souvent rapportées. Des analyses de qualité d'air de l'avion étaient rapportées dans 7 évènements, sans résultats disponibles.

Les 66 évènements correspondaient à 112 personnes dont 96,4 % étaient des membres de l'équipage : 41,1 % d'hôtesse ou stewards, 32,1 % de pilotes et 23,2 % de personnel navigant sans précision. La plupart (92,9 %) a déclaré des symptômes, tous de faible gravité. Les symptômes neurologiques ou neuromusculaires étaient les plus fréquents (91,3 %), avec notamment des céphalées, des vertiges et des paresthésies. La seconde classe de symptômes la plus fréquemment rapportée était des signes digestifs (46,2 %) avec nausées, diarrhée et irritation buccale. Les symptômes respiratoires (39,4 %) comprenaient des douleurs oropharyngées, une irritation des voies aériennes supérieures et de la toux. Lorsque l'information était connue, dans la moitié des cas, l'évolution était toujours favorable.

Il est à noter que les CAP ne sont pas contactés de façon systématique et obligatoire lorsque de tels évènements se produisent. Pour autant, dans cette étude, il n'a pas été constaté d'appels distincts provenant de personnes différentes ayant voyagé dans le même avion. Aucune circonstance particulière n'a été identifiée hormis le fait que ces situations étaient majoritairement rapportées par le personnel navigant et correspondaient le plus souvent à une odeur inhabituelle perçue. Les troubles de santé allégués étaient non spécifiques et sans gravité, ne se rattachant pas à un toxidrome connu. Enfin, dans certains cas, les personnes faisaient un lien entre les odeurs perçues et des émissions d'organophosphorés, sans qu'aucune analyse de qualité de l'air intérieur de l'avion ne permette de confirmer cette hypothèse. Or, en l'absence de marqueurs biologiques d'effets ou d'exposition pertinents, de telles analyses sont nécessaires pour objectiver une altération de la qualité de l'air de l'avion.

Sigles et abréviations

AChE	Acétylcholinestérase
BChE	Butyrylcholinestérase
BNCM	Base nationale des cas médicaux
BNPC	Base nationale des produits et compositions
CAP	Centre antipoison
GT	Groupe de travail
PN	Personnel navigant
PNC	Personnel navigant commercial
PNT	Personnel navigant technique
PSS	<i>Poisoning Severity Score</i>
RTU	Réponse téléphonique à l'urgence
SAC	Service des agents et compositions
SCM	Service des cas médicaux
SGT	Score de gravité en toxicovigilance
SICAP	Système d'information commun des centres antipoison
SID	Système d'information décisionnel

Table des illustrations et annexes

Liste des tableaux

Tableau CAP 1 :Description de l'évènement suite à une suspicion d'altération de la qualité de l'air en avion, rapportés aux CAP entre le 01/01/2000 et le 31/12/2021 (source : SICAP) ..	304
Tableau CAP 2 : Endroit de l'avion où étaient perçus les évènements suite à une suspicion d'altération de la qualité de l'air rapportés aux CAP entre le 01/01/2000 et le 31/12/2021 (source : SICAP)	304
Tableau CAP 3 : Phase de vol pendant laquelle ont été rapportées aux CAP les suspicions d'altération de la qualité d'air en avion entre le 01/01/2000 et le 31/12/2021 (source : SICAP)	305

Liste des figures

Figure CAP 1 : Répartition annuelle du nombre d'évènements rapportés aux CAP entre le 01/01/2000 et le 31/12/2021 suite à une suspicion d'altération de la qualité de l'air en avion (source : SICAP)	303
---	-----

Figure CAP 2 : Type de personnes à l'origine des appels aux CAP suite à une suspicion d'altération de la qualité de l'air en avion, entre le 01/01/2000 et le 31/12/2021 (source : SICAP)	306
Figure CAP 3 : Fréquence des classes de symptômes suite à des suspicions d'altération de la qualité de l'air en avion rapportées aux CAP entre le 01/01/2000 et le 31/12/2021 (source : SICAP)	307

Liste des annexes

<u>Annexe 1 : Description des classes de symptômes et signes cliniques suite à des suspicions d'altération de la qualité d'air en avion rapportées aux CAP entre le 01/01/2000 et le 31/12/2021 (source : SICAP)</u>	22
--	----

1 Contexte de la demande

Dans le cadre de la saisine de l'Anses pour une demande d'avis relatif aux conséquences sanitaires de la pollution de l'air dans les avions de ligne (N° 2019-SA-0075), l'Unité d'Evaluation des Risques liés à l'Air a demandé une analyse des données de la base nationale du Réseau National de Vigilance et de Prévention des Pathologies Professionnelles (RNV3P) concernant les pathologies d'origine professionnelle rencontrées chez le personnel navigant du secteur aérien reçu en consultation dans les centres de consultations de pathologies professionnelles et environnementales (CCPPE).

Une attention particulière a été portée à l'identification de cas mentionnant des symptômes ou un évènement de santé susceptibles d'être associés à des expositions dans l'air pressurisé de cabines d'avion (en anglais « fume event »), qualifiés le plus souvent de syndrome aérotoxique.

2 Présentation du Réseau national de vigilance et de prévention des pathologies professionnelles (RNV3P)

2.1 Contexte et objectifs

Le RNV3P est simultanément un réseau de compétences en santé au travail et santé environnementale, et une base de données sanitaires. Il réunit l'ensemble des 28 CCPPE français, dont les données de consultations (données démographiques du patient, pathologies, expositions, secteurs d'activité, professions, imputabilités entre pathologie et exposition, etc...) sont enregistrées dans le système d'information du RNV3P.

L'Anses, en tant qu'animateur du réseau, a pour mission de coordonner les activités du réseau et participe aux travaux scientifiques associés, en partenariat avec la Caisse nationale d'Assurance maladie des travailleurs salariés et indépendants (Cnam), la Caisse centrale de la Mutualité Sociale Agricole (CCMSA), l'Institut National de Recherche et de Sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles (INRS), Santé publique France et la Société française de santé au travail (SFST).

Ses objectifs principaux sont :

- de repérer et décrire les situations professionnelles à risque sanitaire en France et les pathologies environnementales ;
- de repérer des risques sanitaires (expositions et/ou pathologies) professionnels ou environnementaux émergents ou ré-émergents ;
- d'améliorer et harmoniser les pratiques de diagnostic des pathologies liées au travail et à l'environnement.

Les données des CCPPE reflètent un système de recours à l'expertise de médecins spécialistes de la santé au travail et ne sont pas représentatives de l'ensemble des pathologies en lien avec le travail sur le territoire français, le recrutement des patients dépendant principalement des médecins, autres professionnels de la santé ou tiers (p.ex. avocat, association, etc...) qui les y adressent. Ces données sont utiles dans un objectif de vigilance des risques professionnels ou environnementaux, en permettant de repérer et de décrire des situations à risque sanitaire (ré)-émergentes. Instruits par des spécialistes des pathologies en lien avec le travail et l'environnement, les dossiers enregistrés couvrent l'ensemble des pathologies suspectées d'être professionnelles (indépendamment des considérations médico-légales d'indemnisation) ou environnementales et documentent précisément les expositions.

2.2 Données

Au sein du RNV3P, les données recueillies lors de la consultation d'un patient (données individuelles du patient, données médicales issues de l'examen clinique, données relatives à l'exposition professionnelle ou environnementale du patient) constituent un problème de santé (PS). L'unité statistique de la base est le PS. Quel que soit le motif de consultation, l'avis du médecin du CCPPE s'intègre dans l'une de ces trois activités :

- Le **diagnostic** de l'origine professionnelle et/ou environnementale de pathologie, avec la question de l'**imputabilité** de l'exposition dans la survenue de la pathologie. Le

médecin cherche un éventuel lien entre les expositions professionnelles ou environnementales du patient et sa pathologie. Il estime ensuite la probabilité de lien entre l'affection du patient et chacune des expositions recensées et il attribue à chaque couple « pathologie-exposition » un niveau d'imputabilité de :

- 0 = Pas de relation ;
 - 1 = faible ou douteux ;
 - 2 = moyen (vraisemblable) ;
 - 3 = fort (très vraisemblable).
- **L'orientation, le maintien ou le retour en emploi**, avec la question de la **compatibilité** entre l'état de santé de la personne et son travail actuel ou futur.

Le **dépistage professionnel**, qui consiste en l'identification par le médecin d'une ou plusieurs **exposition(s) professionnelle(s) nécessitant un suivi médical** des patients exposés ou ayant été exposés.

2.3 Codage des données au sein du RNV3P

Les données recueillies lors de la consultation d'un patient documentent un ou plusieurs PS. Ces données sont codées sur le système informatique du RNV3P selon différents référentiels :

- Les pathologies principales et secondaires : selon la **Classification Internationale des Maladies**, version 10 (CIM-10). Des codes spécifiques au RNV3P existent en cas d'absence de code CIM-10.
- Les expositions/les nuisances: selon le **Thésaurus des expositions professionnelles** (TEP).
- Les postes de travail : la **Classification Internationale Type des Professions** (CITP) est utilisée pour coder le poste occupé par le patient au moment de la consultation ou en lien avec l'exposition. Depuis 2014, la version de 2008 (CITP-08) est utilisée.
- Les secteurs d'activité : la **Nomenclature d'Activités Française** (NAF) est utilisée pour coder les secteurs d'activité de l'entreprise dans laquelle exerce le patient au moment de la consultation ou en lien avec l'exposition. Depuis 2014, la version de 2008 (NAF-08) est utilisée.

2.4 Mémo clinique

Un PS (au travail ou environnemental) contient un champ libre appelé mémo clinique, qui vise à résumer le dossier du patient et à apporter des informations complémentaires non renseignées par les variables codées telles que : dates et niveaux d'exposition du patient aux nuisances identifiées, précisions quant au(x) poste(s) de travail pouvant être associé(s) à la survenue de la pathologie lorsque le codage du poste de travail n'est pas suffisamment précis, éventuels facteurs de risque extra-professionnels qui permettent de mieux comprendre le niveau d'imputabilité attribué à l'exposition/(aux) exposition(s) identifiée(s).

2.5 Type de conclusion possible d'un problème de santé dans le cadre de l'activité de diagnostic

Dans le cadre de l'activité de diagnostic des CCPPE, une conclusion doit être formulée par le médecin expert à la fin de la consultation, selon les 4 possibilités suivantes :

- **Pathologie en relation avec le travail (PRT)** : lorsque l'origine professionnelle de la pathologie est envisagée par le médecin. En pratique, cela suppose qu'au moins une des expositions professionnelles du patient a un niveau d'imputabilité supérieur ou égal à faible.
- **Pathologie en relation avec l'environnement (PRE)** : lorsque l'origine environnementale est envisagée par le médecin. En pratique, cela suppose qu'au moins une des expositions environnementales du patient a un niveau d'imputabilité supérieur ou égal à faible.
- **Pathologie ni professionnelle ni environnementale (ni PRT ni PRE)** : lorsqu'aucune de ces 2 origines n'est envisagée. En pratique, cela suppose l'absence d'exposition ou un niveau d'imputabilité estimé nul pour toutes les expositions identifiées.

Ou enfin **Absence de pathologie** lorsqu'à l'issue de la consultation, aucune pathologie n'est identifiée par le médecin.

3 Protocole d'extraction des données du RNV3P en réponse à la saisine

3.1 Objectif de l'extraction

L'objectif premier de l'extraction est d'identifier et de décrire les pathologies en relation avec le travail (PRT) du personnel navigant du secteur aérien (pilote d'avion et steward/hôtesse de l'air) vues par les CCPPE.

Dans un second temps, une attention a été portée à l'identification des PRT dont le mémo clinique ou les données codées mentionnent le « syndrome aérotoxique » ou sont évocateurs d'un événement de santé ou de manifestations cliniques qui pourraient être en relation avec des expositions dans l'air pressurisé de cabines d'avion, d'après les médecins experts des CCPPE.

3.2 Méthodologie et critères d'extraction

3.2.1 Démarche pour identifier les PRT chez le personnel navigant du secteur aérien

Requête exploratoire

Aucun code CITP ou NAF disponible ne permet d'identifier directement la population d'intérêt, i.e. le personnel navigant du secteur aérien. Aussi, une extraction exploratoire a été effectuée sur l'ensemble de la base nationale d'analyse du RNV3P figée le 07 juin 2022, pour identifier les PS relatifs aux postes de travail suivants :

- CITP-08 « 3153 - Pilotes d'avions et assimilés »
- CITP-08 « 5111 - Agents d'accueil et stewards »

Il s'avère que le code CITP-08 « 5111 - Agents d'accueil et stewards » concerne tout aussi bien du personnel du secteur du transport aérien, ferroviaire ou maritime ou encore des agents d'accueil commerciaux, touristiques, etc. Aussi, l'ensemble des dossiers obtenus avec ces deux codes CITP-08 a été parcouru afin d'identifier les différents secteurs d'activités se rapportant à du personnel travaillant dans les domaines de l'aérien ou de l'aéronautique. Les codes et libellés NAF suivants ont ainsi été retenus :

- NAF-93 « 62.2Z - Transports aériens non réguliers »
- NAF-08 « 51 - Transports aériens »
- NAF-08 « 51.10Z - Transports aériens de passagers »
- NAF-08 « 51.21Z - Transports aériens de fret »
- NAF-08 « 30.30Z - Construction aéronautique et spatiale »
- NAF-08 « 84.22Z - Défense »

Des pilotes d'essai et des pilotes de l'armée peuvent appartenir respectivement aux secteurs de la construction aéronautique et de la défense.

Au total, 201 PS sont obtenus en interrogeant la base avec les codes CITP ainsi que les NAF sélectionnés. Toutefois, ces PS concernent à la fois du personnel navigant à bord d'avion (i.e.

la population cible) mais aussi du personnel au sol (travaillant en aéroport). Aucun critère de recherche de la base de données ne permettant de discriminer automatiquement ces 2 populations, il a été nécessaire de considérer les précisions relatives au poste de travail renseignées dans le mémo clinique des cas, étape détaillée dans le chapitre suivant.

Requête ciblée et sélection des cas

L'extraction ciblée de la base nationale d'analyse figée le 07 juin 2022, incluant l'ensemble des PS notifiés par les CCPPE entre 2001 et 2021 (N=329 442), a été réalisée avec les critères suivants :

- codage du poste de travail : [CITP-08 « 3153 - Pilotes d'avions et assimilés » ou « 5111 - Agents d'accueil et stewards »] **et** codage du secteur d'activité : [NAF-93 « 62.2Z - Transports aériens non réguliers » ou NAF-08 « 51 - Transports aériens » ou NAF-08 « 51.10Z - Transports aériens de passagers » ou NAF-08 « 30.30Z - Construction aéronautique et spatiale » ou NAF-08 « 84.22Z - Défense » ou NAF-08 « 51.21Z - Transports aériens de fret »].
- une conclusion de pathologie en relation avec le travail (PRT) a été prononcée par un médecin senior du CCPPE ayant réalisé la consultation du patient. Cela signifie que la probabilité d'un lien entre l'affection du patient et au moins l'une de ses expositions professionnelles a été estimée être a minima faible (codée 1).

Les **126 PRT obtenues selon ces critères d'extraction** ont dû être triées manuellement afin de discriminer les PRT concernant du personnel navigant, présent à bord d'avion, *versus* celles concernant du personnel au sol travaillant en aéroport (p.ex. agent d'escale, chef d'escale, responsable clientèle, etc.). Ce tri a été réalisé à la lecture des mémos cliniques lorsque les informations contenues le permettaient, sinon après renseignement auprès du CCPPE ayant réalisé la consultation du patient (retour au dossier). Ainsi, 21 PRT concernant du personnel du transport aérien restant au sol ont été exclues.

Au final, 105 PRT se rapportant à du personnel navigant des secteurs du transport aérien, de la défense ou de la construction aéronautique ont été retenues. A titre indicatif, 177 804 PRT ont été enregistrées dans la base nationale d'analyse du RNV3P de 2001 à 2021, c'est-à-dire qu'au moins une des expositions professionnelles du patient a un niveau d'imputabilité au moins faible vis-à-vis de la pathologie.

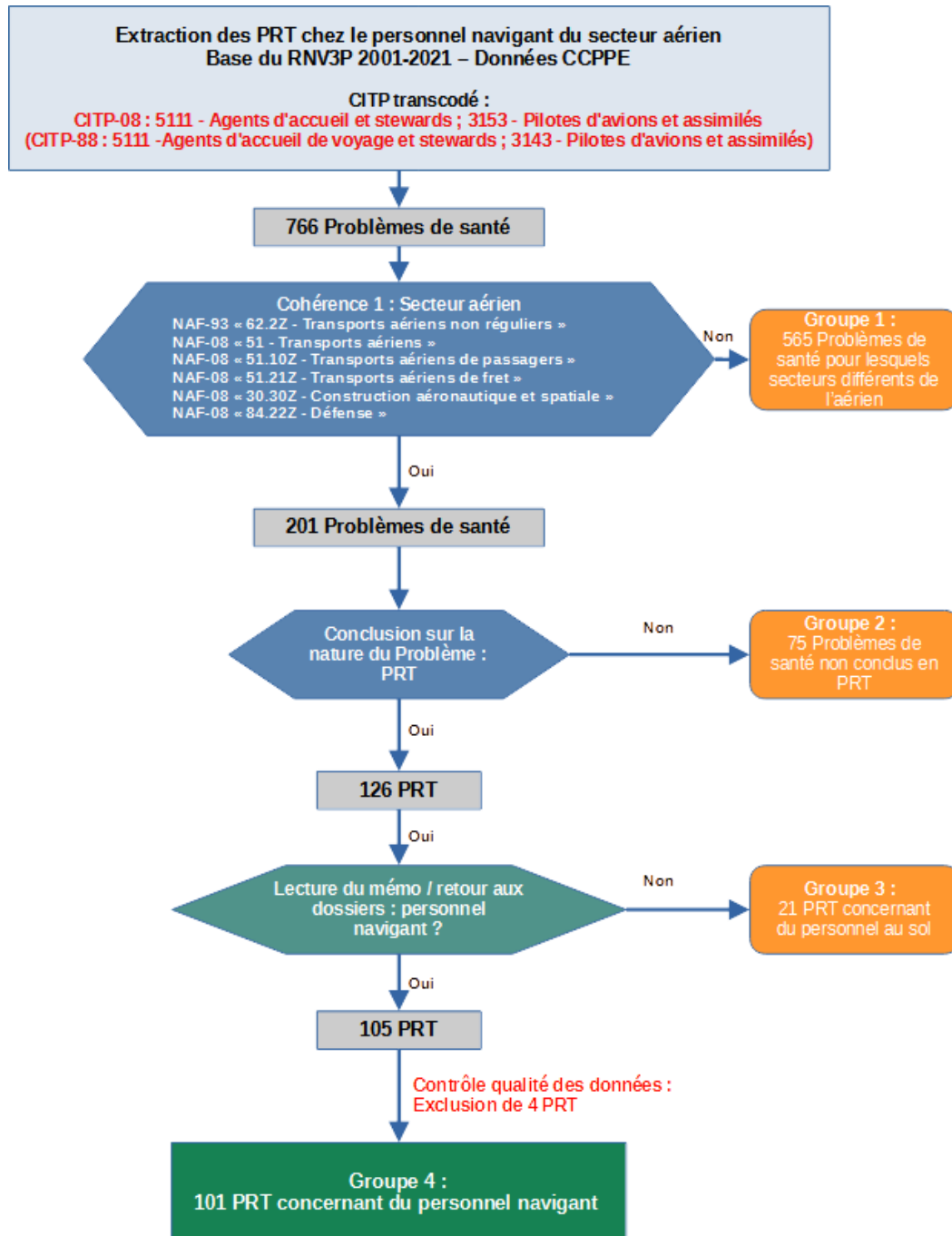
Le contrôle de qualité des données effectué sur ces 105 PRT a entraîné l'exclusion de 4 PRT, après vérification du codage.

Ainsi, **101 PRT se rapportant à des personnels navigants** sont incluses dans l'analyse des pathologies en lien avec le travail enregistrées dans la base du RNV3P.

Synthèse de la démarche

La démarche globale d'identification des PRT concernant le personnel navigant (présent à bord d'avion) est illustrée dans la Figure 15 .

Figure 15 - Démarche d'identification des pathologies en relation avec le travail (PRT) concernant le personnel navigant du secteur aérien



3.2.2 Démarche d'identification des PRT évoquant un lien possible avec des expositions dans l'air intérieur de cabine d'avion dans leur dossier

Il n'existe pas aujourd'hui de consensus médical sur la définition du « syndrome aérotoxique », par conséquent, actuellement, le « syndrome aérotoxique » n'est désigné par aucun code/libellé spécifique de la CIM-10 ou propre au RNV3P. Identifier les PRT susceptibles de correspondre à ce syndrome n'est donc pas possible via le codage de la pathologie principale. Parmi les 101 PRT concernant du personnel navigant du transport aérien, l'identification par un médecin expert de CCPPE des PRT évoquant des symptômes ou un évènement de santé

susceptibles d'être associés à des expositions dans l'air pressurisé de cabines d'avion a été réalisée sur la présence de l'un ou l'autre des critères suivants :

1) la mention, dans le mémo clinique, des termes « syndrome aérotoxique »

et/ou

2) la description, dans le mémo clinique, d'exposition(s) dans l'air intérieur d'une cabine d'avion susceptible(s) d'être rapprochée(s) de la pathologie rapportée (p. ex. : évocation de « fume event », « d'exposition à des fumées d'huile de moteur ») et/ou « d'odeurs âcre/d'huile brûlée/de combustion d'huiles moteur ») et/ou la présence, parmi la liste des expositions professionnelles identifiées et codées comme ayant pu jouer un rôle dans la survenue de la pathologie rapportée, d'exposition(s) dans l'air intérieur d'une cabine d'avion (p. ex. : A16D0000 - huile, graisse et fluide d'usinage industriel ; A16D0300 - produit dégagé lors de la fabrication ou l'utilisation d'huile et graisse industrielle ; A1660B00 - vapeur ou liquide de solvant, diluant ; A16W09ZZ - autre fumée).

4 Résultats de l'extraction

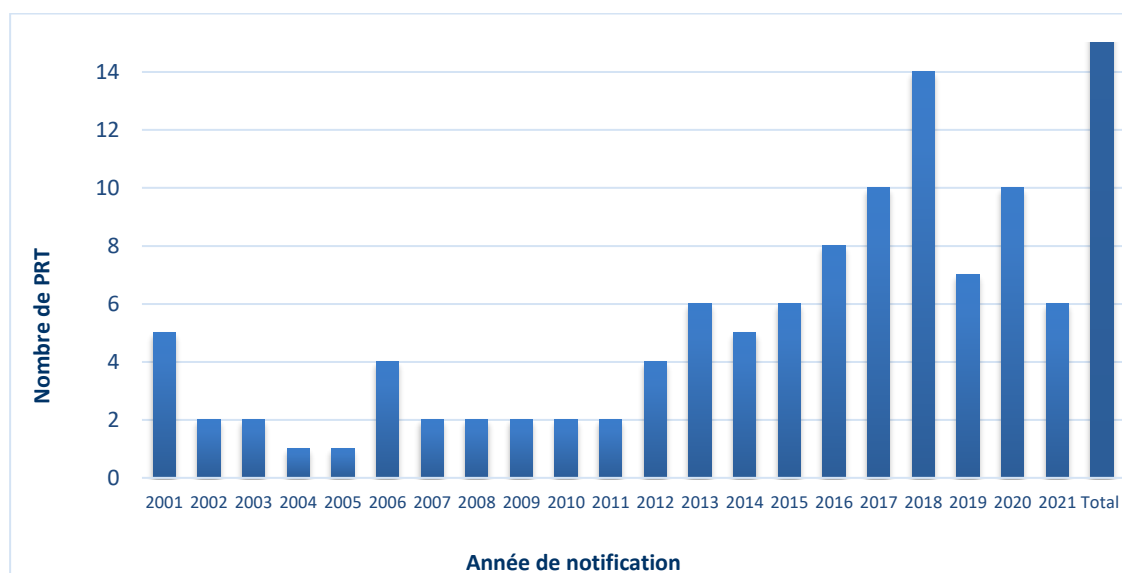
4.1 Description générale des PRT concernant du personnel navigant du transport aérien depuis 2001

Entre 2001 et 2021, 101 PRT concernant du personnel navigant du secteur aérien (et exploitables en termes d'exigence qualité) ont été enregistrées dans la base du RNV3P, dont 68 avec la présence d'une exposition d'imputabilité au maximum moyenne (N=28) ou forte (N=40).

4.1.1 Évolution du nombre de PRT diagnostiquées entre 2001 et 2021

Le nombre annuel de PRT concernant du personnel navigant du transport aérien enregistrées dans la base du RNV3P est compris entre 1 (en 2004 et 2005) jusqu'à un maximum de 14 en 2018 (Figure 16).

Figure 16 - Nombre annuel de PRT enregistrées concernant du personnel navigant du transport aérien de 2001 à 2021



4.1.2 Caractéristiques démographiques des PRT

Les 101 PRT identifiées concernent 51 femmes et 50 hommes (Tableau 1).

Au total, l'âge moyen au moment de la consultation²⁹ est de 47 ans (44 ans chez les femmes et 50 ans chez les hommes). 41% des PRT sont notifiés chez des personnes de la catégorie d'âge entre 40 et 49 ans (45% des PRT chez les femmes et 36% des PRT chez les hommes).

²⁹ L'âge au moment de la consultation correspond à l'âge du patient lors de sa 1^{ère} consultation dans un CCPPE en lien avec sa pathologie.

Tableau 24 - Données démographiques des patients

	Total N=101 (100%)	Femme N=51 (50%)	Homme N=50 (50%)
Age moyen au moment de la consultation (ans)	47	44	50
Écart-type (ans)	12	9	14
Age min - max (ans)	23 - 89 ¹	24 - 69	23 - 89
Catégorie d'âge à la consultation (ans)			
[20-30[	2 (2%)	1 (2%)	1 (2%)
[30-40[	23 (23%)	14 (27%)	9 (18%)
[40-50[	41 (41%)	23 (45%)	18 (36%)
[50-60[	23 (23%)	11 (22%)	12 (24%)
[60-70[	6 (6%)	2 (4%)	4 (8%)
[70-80[	3 (3%)	-	3 (6%)
[80-90[	3 (3%)	-	3 (6%)

Source : données RNV3P – 2001 à 2021

Un diagnostic de pathologie en relation avec le travail peut être porté chez une personne retraitée (p. ex. pour des maladies avec une longue période de latence telles que les cancers) ou chez une personne décédée (dossier présenté par des ayants-droits).

4.1.3 Postes de travail et secteurs d'activité associés

Parmi les 101 PRT identifiées, 58 PRT (57%) sont associées au poste de travail « hôtesse de l'air/steward » occupé très majoritairement par des femmes (à 79%) et 43 PRT (43%) sont associées au poste de pilote d'avion majoritairement occupé par des hommes (à 88%) (Tableau 25). Le secteur d'activité le plus fréquemment concerné est celui du transport aérien de passagers (à 80%).

Tableau 25 - Description des postes de travail et des secteurs d'activité (Source : données RNV3P – 2001 à 2021)

	Total N=101 (100%)	Femme N=51 (50%)	Homme N=50 (50%)
Poste de travail (CITP)			
3153-Pilotes d'avions et assimilés	43 (43%)	5 (10%)	38 (76%)
5111-Agents d'accueil et stewards	58 (57%)	46 (90%)	12 (24%)
Secteur d'activité (NAF)			
30.30Z-Construction aéronautique et spatiale	6 (6%)	-	6 (12%)
51-Transports aériens ¹	7 (7%)	3 (6%)	4 (8%)
51.10Z-Transports aériens de passagers	81 (80%)	47 (92%)	34 (68%)
51.21Z-Transports aériens de fret	1 (1%)	1 (2%)	-
84.22Z-Défense	6 (6%)	-	6 (12%)

¹Le code NAF-93 « 62.2Z - Transports aériens non réguliers » a été regroupé avec le code NAF-08 « 51- Transports aériens, sans précision »

4.1.4 Pathologie principale diagnostiquée

Afin de faciliter la description des 101 pathologies d'origine professionnelle observées chez le personnel navigant du secteur aérien, celles-ci ont été regroupées en catégories de

pathologies fréquemment observées (sur la base de la pathologie principale diagnostiquée, codée selon la CIM-10 ou selon un code/libellé spécifique au RNV3P), soit : les psychopathologies, les cancers, les troubles du sommeil, les troubles musculo-squelettiques (TMS), les « intoxications » correspondant à des manifestations cliniques rapportées à des substances et les troubles de l'audition. Les pathologies qui n'entraient pas dans l'une de ces catégories ont été regroupées dans une catégorie dite « Autre pathologie ». Parmi l'ensemble des PRT identifiées, les psychopathologies ainsi que les cancers sont les plus fréquemment rapportés (22 cas (22%) et 21 cas (21%) respectivement) (Tableau 26)³⁰. Suivent ensuite les troubles du sommeil (13%), les « effets toxiques » de certaines substances (10%), les TMS (7%) et les troubles de l'audition (6%). Les PRT de la catégorie « Autre pathologie » sont des troubles divers (par ex. maladies des voies respiratoires, dermites, maladie infectieuse, etc.) dont le détail figure dans le **Tableau 27**.

La proportion de femmes et d'hommes est équivalente pour les PRT « Psychopathologies » et « Cancers ». Il y a plus de femmes concernées par les troubles du sommeil et les TMS (70% et 85% respectivement), à l'inverse des troubles de l'audition où les hommes sont plus nombreux (83%).

Tableau 26 - Répartition des PRT par catégorie de pathologies selon la pathologie principale codée

	Psycho-pathologie	Cancer	Trouble du sommeil	Intoxication à des substance(s)	Trouble musculo-squelettique	Trouble de l'audition	Autre pathologie
Total* N=101 (100%)	22 (22%)	21 (21%)	13 (13%)	10 (10%)	7 (7%)	6 (6%)	22 (22%)
Femme N=51 (50%)	12 (23%)	10 (20%)	9 (18%)	4 (8%)	6 (12%)	1 (2%)	9 (18%)
Homme N=50 (50%)	10 (20%)	11 (22%)	4 (8%)	6 (12%)	1 (2%)	5 (10%)	13 (26%)

Source : données RNV3P – 2001 à 2021

La description des pathologies principales des PRT regroupées selon les catégories de pathologies évoquées précédemment figure dans le **Tableau 27**.

Tableau 27 - Pathologies principales en relation avec le travail selon le regroupement par catégorie de pathologie

	Total N=101 (100%)	Femme N=51 (50%)	Homme N=50 (50%)
Psychopathologie	22 (22%)	12 (23%)	10 (20%)
F41 - Autres troubles anxieux	9 (9%)	4 (8%)	5 (10%)
F43 - Réaction à un facteur de stress sévère, et troubles de l'adaptation	5 (5%)	3 (6%)	2 (4%)
F32 - Épisodes dépressifs	4 (4%)	4 (8%)	-

³⁰ Les valeurs des pourcentages rapportées dans les tableaux 4 à 5 ayant été arrondies au nombre entier le plus proche, la somme des pourcentages de la répartition peut différer de 100% (99% ou 101%).

F06 - Autres troubles mentaux dus à une lésion cérébrale et un dysfonctionnement cérébral, et à une affection somatique	3 (3%)	1 (2%)	2 (4%)
F48 - Autres troubles névrotiques	1 (1%)	-	1 (2%)
Cancer	21 (21%)	10 (20%)	11 (22%)
C50 - Tumeur maligne du sein	5 (5%)	5 (10%)	-
C34 - Tumeur maligne des bronches et du poumon	4 (4%)	-	4 (8%)
C71 - Tumeur maligne de l'encéphale	2 (2%)	-	2 (4%)
C95 - Leucémie à cellules non précisées	2 (2%)	1 (2%)	1 (2%)
C73 - Tumeur maligne de la thyroïde	1 (1%)	-	1 (2%)
C81 - Lymphome de Hodgkin	1 (1%)	1 (2%)	-
C83 - Lymphome non folliculaire	1 (1%)	-	1 (2%)
C90 - Myélome multiple et tumeurs malignes à plasmocytes	1 (1%)	1 (2%)	-
D04 - Carcinome in situ de la peau	1 (1%)	-	1 (2%)
D45 - Polyglobulie essentielle	1 (1%)	1 (2%)	-
D46 - Syndromes myélodysplasiques	1 (1%)	1 (2%)	-
D47 - Autres tumeurs des tissus lymphoïde, hématopoïétique et apparentés à évolution imprévisible ou inconnue	1 (1%)	-	1 (2%)
Trouble du sommeil	13 (13%)	9 (18%)	4 (8%)
G47 - Troubles du sommeil	12 (12%)	8 (16%)	4 (8%)
F51 - Troubles du sommeil non organiques	1 (1%)	1 (2%)	-
Intoxication à des substances	10 (10%)	4 (8%)	6 (12%)
T59 - Effets toxiques d'autres émanations, gaz et fumées	8 (8%)	3 (6%)	5 (10%)
T52 - Effet toxique de solvants organiques	1 (1%)	1 (2%)	-
T65 - Effet toxique de substances autres et non précisées	1 (1%)	-	1 (2,0%)
Trouble musculo-squelettique	7 (7%)	6 (12%)	1 (2%)
M77 - Autres enthésopathies	2 (2%)	2 (4%)	-
M18 - Arthrose de la première articulation carpo-métacarpienne	1 (1%)	1 (2%)	-
M54 - Dorsalgies	1 (1%)	1 (2%)	-
M72 - Affections fibroblastiques	1 (1%)	1 (2%)	-
M75 - Lésions de l'épaule	1 (1%)	1 (2%)	-
M79 - Autres affections des tissus mous, non classées ailleurs	1 (1%)	-	1 (2%)
Trouble de l'audition	6 (6,0%)	1 (2,0%)	5 (10%)
H83 - Autres maladies de l'oreille interne	2 (2%)	-	2 (4%)
H90 - Surdité de transmission et neurosensorielle	2 (2%)	-	2 (4%)
H91 - Autres pertes de l'audition	2 (2%)	1 (2%)	1 (2%)

Autre pathologie	22 (22%)	9 (18%)	13 (26%)
J45 - Asthme	3 (3%)	2 (4%)	1 (2%)
J68 - Affections respiratoires dues à l'inhalation d'agents chimiques, d'émanations, de fumées et de gaz	2 (2%)	2 (4%)	-
L25 - Dermite de contact, sans précision	2 (2%)	1 (2%)	1 (2%)
R51 - Céphalée	2 (2%)	-	2 (4%)
UZ3 - Syndrome d'intolérance aux odeurs chimiques	2 (2%)	1 (2%)	1 (2%)
A15 - Tuberculose de l'appareil respiratoire, avec confirmation bactériologique et histologique	1 (1%)	1 (2%)	-
E06 - Thyroïdite	1 (1%)	-	1 (2%)
H66 - Otite moyenne suppurée et sans précision	1 (1%)	-	1 (2%)
H69 - Autres affections de la trompe d'Eustache	1 (1%)	1 (2%)	-
I80 - Phlébite et thrombophlébite	1 (1%)	-	1 (2%)
J01 - Sinusite aiguë	1 (1%)	-	1 (2%)
J31 - Rhinite, rhinopharyngite et pharyngite chroniques	1 (1%)	1 (2%)	-
J40 - Bronchite, (non précisée comme aiguë ou chronique)	1 (1%)	-	1 (2%)
J92 - Plaque pleurale	1 (1%)	-	1 (2%)
L23 - Dermite allergique de contact	1 (1%)	-	1 (2%)
L24 - Dermite irritante de contact	1 (1%)	-	1 (2%)

Source : données RNV3P – 2001 à 2021

Caractéristiques des patients en fonction du type de pathologie principale

La description de la catégorie d'âge au moment de la consultation, du poste de travail responsable et de l'origine de la demande de consultation des 101 cas en fonction de la pathologie principale figure dans le **Tableau 28**.

Tableau 28 - Description des PRT selon la catégorie d'âge à la consultation, le poste de travail responsable et l'origine de la demande de consultation

	Psycho-pathologie N=22 (22%)	Cancer N=21 (21%)	Trouble du sommeil N=13 (13%)	Intoxication à des substances N=10 (10%)	Trouble musculo-squelettique N=7 (7%)	Trouble de l'audition N=6 (6%)	Autre pathologie N=22 (22%)
Catégorie d'âge au moment de la consultation							
[20 - 30[	-	-	-	2 (20%)	-	-	-
[30 - 40[	5 (23%)	1 (5%)	5 (38%)	1 (10%)	1 (14%)	-	10 (45%)
[40 - 50[	14 (64%)	8 (38%)	5 (38%)	3 (30%)	2 (29%)	2 (33%)	7 (32%)
[50 - 60[	3 (14%)	3 (14%)	3 (23%)	4 (40%)	4 (57%)	2 (33%)	4 (18%)
[60 - 70[	-	5 (24%)	-	-	-	1 (17%)	-

[70 - 80[	-	2 (9%)	-	-	-	1 (17%)	
[80 - 90[	-	2 (9%)	-	-	-	-	1 (4%)
Poste de travail							
3153-Pilotes d'avions et assimilés	13 (59%)	11 (52%)	3 (23%)	4 (40%)	-	3 (50%)	9 (41%)
5111-Agents d'accueil et stewards	9 (41%)	10 (48%)	10 (77%)	6 (60%)	7 (100%)	3 (50%)	13 (59%)
Origine de la demande de consultation							
Médecin du travail	6 (27%)	2 (10%)	8 (62%)	4 (40%)	-	5 (83%)	9 (41%)
Médecin hospitalier	-	12 (57%)	-	1 (10%)	-	-	3 (14%)
Médecin généraliste	6 (27%)	-	2 (15%)	3 (30%)	4 (57%)	-	1 (4%)
Patient lui-même	1 (4%)	2 (10%)	2 (15%)	2 (20%)	1 (14%)	-	5 (23%)
Spécialiste non hospitalier	6 (27%)	1 (5%)	-	-	2 (29%)	-	3 (14%)
Médecin conseil	1 (4%)	-	-	-	-	1 (17%)	-
Autres	2 (9%)	4 (19%)	1 (8%)	-	-	-	1 (4%)

4.2 Expositions et niveaux d'imputabilité des PRT concernant le personnel navigant du transport aérien

Les expositions professionnelles avec un niveau d'imputabilité au moins faible vis-à-vis de la pathologie principale rapportée sont indiquées dans les tableaux suivants (Tableau 29 à 11), selon les différentes catégories de pathologie établies (*excepté pour la catégorie « Autre pathologie » qui se rapporte à des troubles de nature diverse*). Plusieurs expositions peuvent être renseignées en relation avec une PRT.

Pour rappel, l'imputabilité d'une exposition estimée par un médecin senior de CCPPE peut être de niveau 1 - « Faible » (douteuse), 2 - « Moyenne » (vraisemblable) ou 3 - « Forte » (très vraisemblable). Une forte incertitude existe donc en termes de probabilité de lien entre les expositions d'imputabilité 1 - « Faible » et la pathologie rapportée, néanmoins ce lien ne peut être complètement exclu au regard des informations disponibles lors de la consultation médicale.

Tableau 29 - Expositions de niveau d'imputabilité au moins faible en lien avec les psychopathologies

Exposition et niveau d'imputabilité vis-à-vis de la pathologie diagnostiquée	1-Faible (N=8)	2-Moyen (N=14)	3-Fort (N=17)	Total (N=39)
73110100-relation vécue délétère avec la hiérarchie (critique permanente, manque d'écoute, asymétrie de communication, dont menace implicite de licenciement)	-	2	3	5
72100000-changement dans l'organisation et modalité particulière de management	-	2	2	4
71230000-déplacement professionnel (mission) perturbant la chronobiologie (décalage horaire)	-	1	1	2
73370000-vécu de harcèlement moral au travail	-	1	1	2
73300000-violence interne (autre salarié de l'entreprise)	1	1	-	2
55100000-pression supérieure à la pression atmosphérique	1	1	-	2
2D630200-dérivé organophosphoré	2	-	-	2
A16D0300-produit dégagé lors de la fabrication ou l'utilisation d'huile et graisse industrielle ¹	2	-	-	2
71220000-déplacement professionnel (mission) perturbant la vie sociale avec découcher	-	-	1	1
71420700-travail imposant un contrôle permanent ou excessif des émotions	-	-	1	1
72120000-changement de personnes	-	-	1	1
72210000-surcharge de travail ressentie	-	-	1	1
72710000-inadéquation objectif/moyen	-	-	1	1
73110200-relation vécue délétère dans le collectif de travail ou avec les pairs (ex : mise à l'écart, clivage catégoriel)	-	-	1	1
73320100-vécu de fausse accusation sans procédure	-	-	1	1
73340000-événement traumatisant vécu comme témoin ou relaté	-	-	1	1
76130100-retour après une interruption de travail pour maladie	-	-	1	1
76460000-réaffectation souhaitée sur un autre poste	-	-	1	1
73120200-déficit vécu de soutien du collectif de travail ou des pairs	-	1	-	1
73100000-qualité de la relation au travail	-	1	-	1
721Z0000-autre changement dans l'organisation	-	1	-	1
72110000-restructuration importante dans les mois écoulés ou à venir	-	1	-	1
71420100-activité demandant une vigilance, une concentration, une attention soutenue	-	1	-	1
71420300-contact régulier avec le public	-	1	-	1

73330000-agression, violence physique subie	1	-	-	1
51310000-confinement manque de ventilation	1	-	-	1

¹ Les codes débutant par A se rapportent à un produit/un procédé industriel

Source : données RNV3P – 2001 à 2021

Tableau 30 - Expositions d'imputabilité au moins faible en lien avec les cancers

Exposition et niveau d'imputabilité vis-à-vis de la pathologie diagnostiquée	1 - Faible (N=16)	2 - Moyen (N=3)	3 - Fort (N=5)	Total (N=24)
56300000-rayonnement ionisant	8	1	3	12
71120000-travail de nuit	1	-	2	3
42110000-amiante (fibre)	1	1	-	2
56200000-rayonnement non ionisant	1	1	-	2
21170204-trichloroéthylène	1	-	-	1
21310100-benzène	1	-	-	1
21320000-hydrocarbure aromatique polycyclique	1	-	-	1
A16H0110-fioul (carburant diesel) ¹	1	-	-	1
A16P0000-produit pesticide (biocide, insecticide, rodenticide, fongicide, engrais) ¹	1	-	-	1

¹ Les codes débutant par A se rapportent à un produit/un procédé industriel

Source : données RNV3P – 2001 à 2021

Tableau 31 - Expositions d'imputabilité au moins faible en lien avec des troubles du sommeil

Exposition et niveau d'imputabilité vis-à-vis de la pathologie diagnostiquée	1 - Faible (N=1)	2 - Moyen (N=7)	3 - Fort (N=10)	Total (N=18)
71110000-travail posté (2x8, 3x8, 5x8...)	-	2	2	4
71230000-déplacement professionnel (mission) perturbant la chronobiologie (décalage horaire)	-	1	2	3
71100000-horaire de travail	1	-	2	3
71180000-imprévisibilité des horaires de travail	-	-	2	2
71120000-travail de nuit	-	2	-	2
711Z0000-autre horaire de travail	-	2	-	2
71420100-activité demandant une vigilance, une concentration, une attention soutenue	-	-	1	1
71120200-travail de nuit régulier (>5 nuits par mois)	-	-	1	1

Source : données RNV3P – 2001 à 2021

Tableau 32 - Expositions d'imputabilité au moins faible en lien avec des intoxications à des substances

Exposition et niveau d'imputabilité vis-à-vis de la pathologie diagnostiquée	1 - Faible (N=1)	2 - Moyen (N=5)	3 - Fort (N=7)	Total (N=13)
A16D0200-huile et graisse lubrifiante ¹	-	-	2	2
C1050000-avion ²	-	-	2	2
A16D0400-produit de décomposition thermique d'huile et graisse industrielle ¹	-	1	1	2
A16D02Y0-déchet d'huile et graisse lubrifiante ¹	-	2	-	2
C10CZZ00-autre type de cabine ²	-	-	1	1
A1660B00-vapeur ou liquide de solvant, diluant ¹	-	-	1	1
A16W09ZZ-autre fumée ¹	-	1	-	1
A2500000-odeur ¹	-	1	-	1
2D630200-dérivé organophosphoré	1	-	-	1

¹ Les codes débutant par A se rapportent à un produit/un procédé industriel

² Les codes débutant par C se rapportent à un lieu/un local de travail

Source : données RNV3P – 2001 à 2021

Tableau 33 - Expositions d'imputabilité au moins faible en lien avec des troubles musculo-squelettiques

Exposition et niveau d'imputabilité vis-à-vis de la pathologie diagnostiquée	1 - Faible (N=6)	2 - Moyen (N=1)	3 - Fort (N=2)	Total (N=9)
63120200-posture debout prolongée avec piétinement	1	-	1	2
632Z0000-autre posture du membre inférieur	-	-	1	1
62000000-mouvement répétitif	-	1	-	1
57100000-vibration transmise au système main/bras	1	-	-	1
61200000-manutention de charge, manutention de personne	1	-	-	1
62220000-mouvement répétitif du coude	1	-	-	1
62240000-mouvement répétitif de l'épaule	1	-	-	1
6332ZZ00-autre posture du poignet, main, doigt	1	-	-	1

Source : données RNV3P – 2001 à 2021

Tableau 34 - Expositions d'imputabilité au moins faible en lien avec des troubles de l'audition

Exposition et niveau d'imputabilité vis-à-vis de la pathologie diagnostiquée	1 - Faible (N=2)	2 - Moyen (N=4)	3 - Fort (N=1)	Total (N=7)
57310100-bruit continu	1	2	-	3
57310000-vibration sonore audible	1	-	1	2

57310200-bruit impulsionnel	-	1	-	1
C1050000-avion ¹	-	1	-	1

¹ Les codes débutant par C se rapportent à un lieu/un local de travail

Source : données RNV3P – 2001 à 2021

4.3 PRT mentionnant des manifestations cliniques possiblement en lien avec des expositions dans l'air intérieur de cabine d'avion

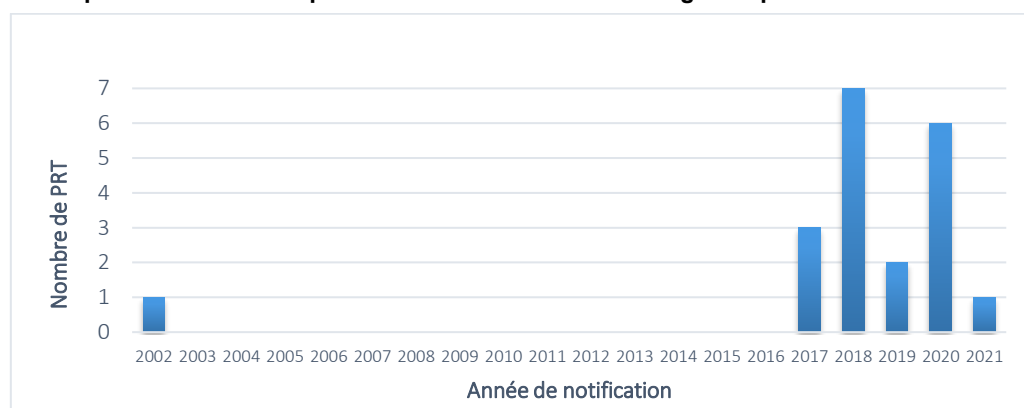
Parmi les 101 PRT, 20 PRT dont le mémo clinique ou les données codées mentionnaient des symptômes/un évènement de santé possiblement en lien avec des expositions ayant eu lieu dans l'air intérieur d'une cabine d'avion ont été identifiées selon la démarche décrite dans le chapitre 3.2.2.

- 6 dossiers font mention des termes « syndrome aérotoxique » dans leur mémo clinique ;
- 17 dossiers font mention dans leur mémo clinique, de la déclaration du patient d'avoir expérimenté un épisode de « fume events » et/ou d'avoir été exposé à des fumées d'huiles moteur et/ou d'avoir senti une odeur âcre/de combustion d'huile moteur lors d'un vol, soit accompagné dans le mémo clinique d'une description de symptômes aspécifiques (p.ex. céphalée, asthénie, vertiges, troubles cognitifs, douleurs diffuses, troubles visuels, rhinite), soit associé à une pathologie principale codée de type « Intoxication » (codes T59 - Effets toxiques d'autres émanations, gaz et fumées ; T52 - Effet toxique de solvants organiques) ;
- 2 dossiers renseignent une pathologie principale codée en T59 - Effets toxiques d'autres émanations, gaz et fumées, associée aux exposition(s) codée(s) pour l'un « A16D0200 - Huile et graisse lubrifiante » et pour l'autre « A16D0400 - Produit de décomposition thermique d'huile et graisse industrielle » et A16W09ZZ - Autre fumée ».

4.3.1 Évolution du nombre de PRT évoquant des manifestations cliniques possiblement en lien avec des expositions dans l'air pressurisé de cabine d'avion entre 2001 et 2021 et CCPPE rapporteurs

La quasi-totalité des PRT évoquant des manifestations cliniques possiblement en lien avec des expositions dans l'air pressurisé de cabine d'avion a été enregistrée à partir de 2017 (Figure 17; N=19 cas sur 20).

Figure 17 - Nombre annuel de PRT évoquant des manifestations cliniques possiblement en lien avec des expositions dans l'air pressurisé de cabine d'avion diagnostiquées de 2001 à 2021



Source : données RNV3P – 2001 à 2021

Les 20 PRT proviennent de 6 CCPPE, dont 2 en Ile-de-France qui rapportent la majorité des cas (13/20).

4.3.2 Description des 20 PRT mentionnant des manifestations cliniques possiblement en lien avec des expositions dans l'air intérieur d'une cabine d'avion

Les 20 PRT concernent 15 hommes (75%) et 5 femmes (25%). L'âge médian à la consultation est de 43,5 ans (Tableau 35).

Tableau 35 - Caractéristiques démographiques des patients

	Total N=20 (100%)	Femme N=5 (25%)	Homme N=15 (75%)
Age médian à la consultation (ans)	43,5	37	48
Age min - max (ans)	23 - 54	24 - 48	23 - 54
Catégorie d'âge à la consultation (ans)			
[20 - 30[	2 (10%)	1 (20%)	1 (7%)
[30 - 40[	6 (30%)	2 (40%)	4 (27%)
[40 - 50[	5 (25%)	2 (40%)	3 (20%)
[50 - 60[	7 (35%)	-	7 (47%)

Source : données RNV3P – 2001 à 2021

Le poste de travail « Pilotes d'avions et assimilés » est majoritaire parmi ces 20 cas (65%) ainsi que le secteur d'activité du transport aérien de passagers (75%). La demande de consultation provient le plus fréquemment d'un médecin du travail (25%) ou du patient lui-même (25%) (Tableau 36).

Tableau 36 - Postes de travail, secteurs d'activité et origine de la demande de consultation

	Total N=20 (100%)
Poste de travail	
3153-Pilotes d'avions et assimilés	13 (65%)
5111-Agents d'accueil et stewards	7 (35%)
Secteur d'activité	
51.10Z-Transports aériens de passagers	15 (75%)
30.30Z-Construction aéronautique et spatiale	5 (25%)
Origine de la demande	
Médecin du travail	5 (25%)
Patient lui-même	5 (25%)
Médecin généraliste	4 (20%)
Spécialiste non hospitalier	3 (15%)
Médecin conseil	1 (5%)
Autres	1 (5%)
Médecin hospitalier	1 (5%)

Source : données RNV3P – 2001 à 2021

La pathologie principale codée pour ces 20 PRT est indiquée dans le Tableau 37. Au regard de la pathologie principale codée, ces 20 PRT étaient codées dans l'une des trois catégories de pathologies suivantes : « Intoxications », « Psychopathologies » ou « Autres pathologies ».

Il est important de souligner que pour 7 de ces PRT les exposition(s) sont d'imputabilité estimée au maximum de niveau faible (douteuse). **Une forte incertitude sous-tend la probabilité de lien entre l'exposition rapportée par le patient et les symptômes le plus souvent rapportés par le patient et/ou le diagnostic retenu au terme de la consultation.** A titre d'exemple, le mémo clinique de la pathologie en relation avec le travail « Thyroïdite auto-immune » précise que le lien entre la pathologie/les symptômes décrits et l'exposition « à un air de cabine d'avion contaminé par des huiles moteur » rapporté par le patient est peu probable.

Par ailleurs, les pathologies codées avec des libellés rapportant des effets toxiques doivent être considérées avec prudence. En effet, il est incertain d'après l'état des connaissances scientifiques actuelles qu'un mécanisme toxicologique soit en jeu dans la survenue de manifestations cliniques dans un contexte de fume events/d'inhalation d'odeur âcre ou évocatrice de combustion d'huile dans une cabine d'avion.

Tableau 37 - Description des pathologies principales évoquant des manifestations cliniques possiblement en lien avec des expositions dans l'air pressurisé de cabine d'avion d'imputabilité de niveau au minimum faible

	Total N=20 (100%)	Femme N=5 (25%)	Homme N=15 (75%)
T59 - Effets toxiques d'autres émanations, gaz et fumées	8 (40%)	3 (60%)	5 (33%)
F06 - Autres troubles mentaux dus à une lésion cérébrale et un dysfonctionnement cérébral, et à une affection somatique	2 (10%)	-	2 (13%)
R51 - Céphalée	2 (10%)	-	2 (13%)
E06 - Thyroïdite	1 (5%)	-	1 (7%)
F48 - Autres troubles névrotiques	1 (5%)	-	1 (7%)
J31 - Rhinite, rhinopharyngite et pharyngite chroniques	1 (5%)	1 (20%)	-
J40 - Bronchite, (non précisée comme aiguë ou chronique)	1 (5%)	-	1 (7%)
J45 - Asthme	1 (5%)	-	1 (7%)
T52 - Effet toxique de solvants organiques	1 (5%)	1 (20%)	-
T65 - Effet toxique de substances autres et non précisées	1 (5%)	-	1 (7%)
UZ3 - Syndrome d'intolérance aux odeurs chimiques	1 (5%)	-	1 (7%)

Source : données RNV3P – 2001 à 2021

4.3.3 Expositions et niveaux d'imputabilité au moins faible des PRT mentionnant des manifestations cliniques possiblement en lien avec des expositions dans l'air intérieur d'une cabine d'avion

Les expositions identifiées avec un niveau d'imputabilité au moins faible pour les 20 PRT se référant à des manifestations cliniques possiblement en lien avec une/de(s) exposition(s) dans l'air intérieur d'une cabine d'avion sont décrites dans le Tableau 38. Plusieurs expositions peuvent être renseignées en relation avec une PRT.

Tableau 38 - Expositions associées à un niveau d'imputabilité au moins faible des PRT mentionnant des manifestations cliniques possiblement liées à une/des exposition(s) dans l'air intérieur d'une cabine d'avion (plusieurs expositions possibles en relation avec une PRT)

Exposition et niveau d'imputabilité vis-à-vis de la pathologie diagnostiquée	1 - Faible (N=11)	2 - Moyen (N=8)	3 - Fort (N=10)	Total (N=29)
A16D0200-huile et graisse lubrifiante ¹			3	3
A16D02Y0-déchet d'huile et graisse lubrifiante ¹		2		2
A16D0400-produit de décomposition thermique d'huile et graisse industrielle ¹		1	1	2
A16D0300-produit dégagé lors de la fabrication ou l'utilisation d'huile et graisse industrielle ¹	2			2

A16D0000-huile, graisse et fluide d'usinage industriel ¹	1	1		2
A1660B00-vapeur ou liquide de solvant, diluant ¹			1	1
A1660000-solvant, diluant ¹	1			1
A16H0500-gaz d'échappement ¹			1	1
A16W09ZZ-autre fumée ¹		1		1
A2500000-odeur ¹		1		1
C1050000-avion ²			2	2
C10CZZ00-autre type de cabine ²			1	1
2D630104-phosphate de tricrésyle	1		1	2
2D630200-dérivé organophosphoré	3	2		5
1AP00000-phosphore et ses composés inorganiques	1			1
51310000-confinement manque de ventilation	1			1
55100000-pression supérieure à la pression atmosphérique	1			1

Source : données RNV3P – 2001 à 2021

¹ Les codes débutant par A se rapportent à un produit/un procédé industriel

² Les codes débutant par C se rapportent à un lieu/un local de travail

4.3.4 Analyse des problèmes de santé concluant à une absence d'imputabilité des expositions dans l'air intérieur d'une cabine d'avion

Compte tenu des évolutions des consignes de codage du niveau d'imputabilité au sein du RNV3P au fil des années, une analyse complémentaire a été menée sur les PS conclus en « ni PRT ni PRE » (situations pour lesquelles aucun lien entre la pathologie et la/les exposition(s) professionnelle(s) et environnementale(s) identifiée(s) n'a pu être établi par le médecin expert, l'imputabilité entre la/les exposition(s) ayant alors été codée = 0).

Parmi les 201 PS concernant les postes de travail « Pilotes d'avions et assimilés » ou « Agents d'accueil et stewards » associés aux secteurs du transport aérien, de la défense ou de la construction aéronautique et spatiale, 47 ont été conclus en « ni PRT ni PRE ». Les mémos cliniques de ces 47 PS (incluant du personnel au sol et navigant) ont fait l'objet d'une étude spécifique afin d'identifier si certains faisaient mention de « syndrome aérotoxique » potentiel ou d'expositions dans l'air de cabine d'avion rapportées par le patient.

Au final, 5 de ces PS mentionnent de telles expositions dans leur mémo clinique. Ces 5 PS ont été enregistrés entre 2017 et 2021, concernent 2 femmes et 3 hommes, âgés de 45 à 59 ans au moment de la consultation, et parmi lesquels 3 concernent un poste de travail de pilotes d'avion et 2 un poste d'hôtesse de l'air/steward. Quatre de ces cas sont associés au secteur du transport aérien de passagers, le 5^{ème} étant associé au secteur de la construction aéronautique. Ces 5 cas ont été vus en consultation dans 4 CCPPE.

Les pathologies principales codées et les expositions d'imputabilité jugée nulle associées à ces 5 cas sont détaillées dans le Tableau 39.

Tableau 39 - Pathologies principales codées pour 5 problèmes de santé conclus en ni PRT ni PRE évoquant des expositions dans l'air de cabine d'avion rapportées par le patient, associées à un niveau d'imputabilité nulle (plusieurs expositions possibles en relation avec une PRT)

Pathologie principale codée	Total (N=5)
F06 - Autres troubles mentaux dus à une lésion cérébrale et un dysfonctionnement cérébral, et à une affection somatique	2
T59 - Effets toxiques d'autres émanations, gaz et fumées	1
C67 - Tumeur maligne de la vessie	1
D30 - Tumeur bénigne des organes urinaires	1
Exposition identifiée, mais jugée sans lien avec la pathologie	Total (N=9)
C1050000-avion²	3
2D630104-phosphate de tricrésyle	2
A16D0200-huile et graisse lubrifiante¹	1
A16D0300-produit dégagé lors de la fabrication ou l'utilisation d'huile et graisse industrielle¹	1
56300000-rayonnement ionisant	1
71180000-imprévisibilité des horaires de travail	1

Source : données RNV3P – 2001 à 2021

¹ Les codes débutant par A se rapportent à un produit/un procédé industriel

² Les codes débutant par C se rapportent à un lieu/un local de travail

A la lecture des mémos cliniques de ces 5 PS conclus en ni PRT ni PRE, il apparaît que pour 3 d'entre eux la possibilité d'un lien entre des manifestations cliniques rapportées par les patients et les expositions n'est pas totalement exclue. Il s'agit des pathologies principales suivantes : F06 - Autres troubles mentaux dus à une lésion cérébrale et un dysfonctionnement cérébral, et à une affection somatique (N=2, chez un pilote de ligne et un pilote d'essai) et T59 - Effets toxiques d'autres émanations, gaz et fumées (N=1, chez une hôtesse de l'air).

Les recommandations actuelles de codage des données au sein du système d'information du RNV3P préconisant de coder un niveau d'imputabilité faible lorsqu'il n'est pas possible d'exclure avec certitude la possibilité d'un lien entre un évènement de santé et une exposition (du fait d'un manque de consensus au niveau scientifique par exemple), ces trois cas peuvent a priori être considérés comme des PRT avec imputabilité faible (douteuse) pour les expositions renseignées (2D630104-phosphate de tricrésyle ; C1050000-avion ; A16D0200-huile et graisse lubrifiante).

5 Discussion

Cette étude porte sur les données des 28 CCPPE répartis sur le territoire français métropolitain. Ce sont des centres de recours à l'expertise, aussi les données qui y sont collectées ne sont pas représentatives de l'ensemble des pathologies observées en santé au travail.

Il n'y a pas dans la base RNV3P de variable spécifique permettant d'identifier directement la population du personnel navigant du secteur aérien. Aussi, pour définir la population d'étude, plusieurs étapes ont été mises en œuvre, décrites dans ce rapport. Pour discriminer le personnel navigant du personnel au sol, il a fallu s'appuyer sur les informations contenues dans le mémo clinique des dossiers, voire interroger les centres ayant vu les patients. En cas de doute sur le fait qu'un patient ait travaillé ou travaille à bord d'avion, le dossier n'a pas été retenu.

Le « syndrome aérotoxique » n'est actuellement désigné par aucun code/libellé spécifique de la CIM-10 ou propre au RNV3P, du fait de l'absence de consensus médical sur sa définition. De même, il n'existe pas non plus de consensus scientifique sur les expositions susceptibles d'être à l'origine de ce syndrome. Aussi, les dossiers évoquant des manifestations cliniques possiblement en lien avec des expositions chimiques dans l'air intérieur de cabine d'avion ont été identifiés sur jugement d'expert, à partir des informations contenues dans les mémos cliniques (mention textuelle de ce syndrome et/ou de toute exposition dans l'air intérieur d'une cabine d'avion rapportée par le patient) et/ou du codage de la pathologie principale et des expositions professionnelles. Les dossiers ainsi identifiés présentent une forte hétérogénéité de codage des expositions possiblement imputables à la pathologie diagnostiquée ou aux symptômes rapportés. Le médecin du CCPPE ne pouvant investiguer précisément la nature des expositions rapportées par le patient, celles-ci doivent être considérées avec prudence, sans conclure avec certitude que les dossiers ainsi identifiés correspondent à des cas de « syndrome aérotoxique ».

6 Synthèse

Cette étude porte sur les données des 28 CCPPE répartis sur le territoire français métropolitain. Ce sont des centres de recours à l'expertise, aussi les données qui y sont collectées ne sont pas représentatives de l'ensemble des pathologies observées en santé au travail.

Il n'y a pas dans la base RNV3P de variable spécifique permettant d'identifier directement la population du personnel navigant du secteur aérien. Aussi, pour définir la population d'étude, plusieurs étapes ont été mises en œuvre, décrites dans ce rapport. Pour discriminer le personnel navigant du personnel au sol, il a fallu s'appuyer sur les informations contenues dans le mémo clinique des dossiers, voire interroger les centres ayant vu les patients. En cas de doute sur le fait qu'un patient ait travaillé ou travaille à bord d'avion, le dossier n'a pas été retenu.

Le « syndrome aérotoxique » n'est actuellement désigné par aucun code/libellé spécifique de la CIM-10 ou propre au RNV3P, du fait de l'absence de consensus médical sur sa définition. De même, il n'existe pas non plus de consensus scientifique sur les expositions susceptibles d'être à l'origine de ce syndrome. Aussi, les dossiers évoquant des manifestations cliniques possiblement en lien avec des expositions chimiques dans l'air intérieur de cabine d'avion ont été identifiés sur jugement d'expert, à partir des informations contenues dans les mémos cliniques (mention textuelle de ce syndrome et/ou de toute exposition dans l'air intérieur d'une cabine d'avion rapportée par le patient) et/ou du codage de la pathologie principale et des expositions professionnelles. Les dossiers ainsi identifiés présentent une forte hétérogénéité de codage des expositions possiblement imputables à la pathologie diagnostiquée ou aux symptômes rapportés. Le médecin du CCPPE ne pouvant investiguer précisément la nature des expositions rapportées par le patient, celles-ci doivent être considérées avec prudence, sans conclure avec certitude que les dossiers ainsi identifiés correspondent à des cas de « syndrome aérotoxique ».

Annexe 10. Rapport d'étude des cas de toxicovigilance

Suspicion d'altération de la qualité de l'air en avion

Bilan des cas rapportés aux Centres antipoison du 1^{er} janvier 2000 au 31 décembre 2021

Contribution au rapport global de l'Anses

Saisine n°2019-SA-0075 « Avions »

RAPPORT d'étude de toxicovigilance

Groupe de travail « Vigilance des produits chimiques »

Mai 2023

Présentation des intervenants

Groupe de travail « vigilance des produits chimiques »

Présidente

Christine TOURNOUD Médecin toxicologue – Praticien hospitalier – Centre antipoison Est – CHRU de Nancy

Membres

Alain AYMARD Ingénieur Chimie ParisTech et ancien enquêteur de la DGCCRF

Ingrid BLANC-BRISSET Médecin toxicologue - Praticien hospitalier - Centre antipoison de Bordeaux - CHU de Bordeaux

Jean-Luc BOURRAIN Praticien hospitalier en allergologie et dermato-allergologie – CHU de Montpellier - Coordinateur du Réseau de vigilance en dermatologie allergologie (Revidal) et administrateur de la plateforme Internet Advicemedia - Membre de l'Institut Desbrest d'Epidémiologie et de Santé Publique, UMR INSERM - Université de Montpellier

Weniko CARE Médecin du Service de Santé des Armées – Interniste et toxicologue - Hôpital d'instruction des armées Bégin, Saint-Mandé - Centre antipoison de Paris, Hôpital Fernand-Widal

Cécile CHEVALLIER Pharmacien praticien attaché en addictovigilance – toxicovigilance - Centre antipoison de Lyon - Hospices Civils de Lyon

Greta GOURIER Médecin dermatologue et allergologue, Attachée au Centre de Ressources en Pathologies Professionnelles et Environnementales - CHRU Brest

Jérôme LANGRAND Médecin toxicologue - Praticien hospitalier - Chef de service - Centre antipoison de Paris - Hôpital Fernand-Widal

Jean-Pierre LEPOITTEVIN Professeur des universités – Membre du Réseau de vigilance en dermatologie allergologie - Directeur du laboratoire de dermatochimie - Université de Strasbourg

Géraldine MEYER Médecin du Travail - Praticien Hospitalier - Centre antipoison Grand Ouest - CHU d'Angers

Catherine PECQUET Ancienne Praticien hospitalier en dermatologie et allergologie à l'hôpital Tenon – AP-HP

Emmanuel PUSKARCZYK Médecin toxicologue - Praticien hospitalier - Chef de service - Centre antipoison Est – CHRU de Nancy

Jean-Marc SAPORI Médecin toxicologue – Praticien hospitalier - Hôpital Nord-Ouest Villefranche sur Saône

Rapporteurs

Hervé LABORDE-CASTEROT Médecin du travail - Praticien hospitalier - Centre antipoison de Paris - AP-HP Université de Paris

Magali OLIVA-LABADIE Médecin urgentiste - Praticien hospitalier – Chef de service – Centre antipoison de Bordeaux - CHU de Bordeaux

Participation Anses « Direction Alertes et vigilances sanitaires »

Coordination et contribution scientifique

Chloé GREILLET Pharmacien – Chargée d'étude en toxicovigilance

Cécilia SOLAL Pharmacien toxicologue - Chargée d'étude en toxicovigilance

Secrétariat administratif

Agnès BRION

Validation du rapport d'étude

Juliette BLOCH Pédiatre et épidémiologiste – Directrice

SOMMAIRE

1	Contexte de la demande.....	266
2	Présentation du Réseau national de vigilance et de prévention des pathologies professionnelles (RNV3P).....	267
2.1	Contexte et objectifs	267
2.2	Données	267
2.3	Codage des données au sein du RNV3P.....	268
2.4	Mémo clinique	268
2.5	Type de conclusion possible d'un problème de santé dans le cadre de l'activité de diagnostic.....	269
3	Protocole d'extraction des données du RNV3P en réponse à la saisine	270
3.1	Objectif de l'extraction	270
3.2	Méthodologie et critères d'extraction.....	270
3.2.1	Démarche pour identifier les PRT chez le personnel navigant du secteur aérien ..	270
3.2.2	Démarche d'identification des PRT évoquant un lien possible avec des expositions dans l'air intérieur de cabine d'avion dans leur dossier.....	272
4	Résultats de l'extraction	274
4.1	Description générale des PRT concernant du personnel navigant du transport aérien depuis 2001.....	274
4.1.1	Évolution du nombre de PRT diagnostiquées entre 2001 et 2021.....	274
4.1.2	Caractéristiques démographiques des PRT.....	274
4.1.3	Postes de travail et secteurs d'activité associés	275
4.1.4	Pathologie principale diagnostiquée	275
4.2	Expositions et niveaux d'imputabilité des PRT concernant le personnel navigant du transport aérien	279
4.3	PRT mentionnant des manifestations cliniques possiblement en lien avec des expositions dans l'air intérieur de cabine d'avion	283
4.3.1	Évolution du nombre de PRT évoquant des manifestations cliniques possiblement en lien avec des expositions dans l'air pressurisé de cabine d'avion entre 2001 et 2021 et CCPPE rapporteurs.....	283
4.3.2	Description des 20 PRT mentionnant des manifestations cliniques possiblement en lien avec des expositions dans l'air intérieur d'une cabine d'avion.....	284
4.3.3	Expositions et niveaux d'imputabilité au moins faible des PRT mentionnant des manifestations cliniques possiblement en lien avec des expositions dans l'air intérieur d'une cabine d'avion	286

4.3.4	Analyse des problèmes de santé concluant à une absence d'imputabilité des expositions dans l'air intérieur d'une cabine d'avion	287
5	Discussion	289
7	Contexte, objet et modalités de réalisation de l'étude	299
7.1	Contexte et objectifs	299
7.2	Modalités de réalisation des travaux : moyens mis en œuvre et organisation	299
7.3	Prévention des risques de conflits d'intérêts	299
8	Matériel et méthodes	300
8.1	Schéma et période de l'étude	300
8.2	Source de données : le système d'information des Centres antipoison (SICAP)...	300
8.2.1	Base des agents	300
8.2.2	Base des cas	300
8.3	Définition et sélection des cas et évènements d'intérêt	301
8.4	Méthodes d'évaluation des cas.....	302
8.4.1	Imputabilité	302
8.4.2	Gravité.....	302
8.4.3	Grille de relecture des cas	302
9	Résultats	303
9.1	Analyse des évènements.....	303
9.1.1	Évolution temporelle	303
9.1.2	Description des évènements.....	303
9.1.3	Endroit de l'avion	304
9.1.4	Phase de vol.....	304
9.1.5	Analyses de qualité de l'air de l'avion	305
9.2	Analyse des cas	305
9.2.1	Âge et sex-ratio	305
9.2.2	Type de personnes.....	305
9.2.3	Description des symptômes.....	306
10	Discussion	308
11	Conclusion	310
12	Bibliographie.....	311

Synthèse

Dans le cadre de la saisine de l'Anses relative à la qualité de l'air dans les avions et à ses conséquences sur la santé, une étude de toxicovigilance a été réalisée à partir des cas

rapportés aux centres antipoison (CAP) entre le 1^{er} janvier 2000 et le 31 décembre 2021. Les événements d'intérêt correspondaient à des situations où une ou plusieurs personnes avaient rapporté une odeur inhabituelle ou manifesté des symptômes, ressentis comme étant en lien avec une altération de la qualité de l'air de l'avion.

Sur cette période d'étude, 66 événements ont été identifiés. L'évolution annuelle a montré une augmentation des événements rapportés aux CAP à partir de 2014 jusqu'en 2019, puis une diminution en 2020 et 2021. L'évènement était décrit par la perception d'une odeur inhabituelle dans presque un événement sur deux (47,0 %), de « vapeur/gaz » (24,2 %) ou de fumée (19,7 %). Lorsque l'information était connue (80,6 %), l'odeur perçue était décrite majoritairement comme une odeur de « chaussettes mouillées » (8 événements), de « kérosène » (4 événements) et d'« huile de moteur » (4 événements). Les endroits de l'avion où se situait la personne lors de la perception de l'évènement étaient le plus souvent le cockpit (33,3 %) ou la cabine (30,3 %). L'évènement pouvait être perçu à plusieurs moments d'un même vol (27,3 %) ou uniquement pendant une phase du vol : la croisière (19,7 %), moins souvent l'atterrissage (12,1 %) et le décollage (4,5 %). Quelle que fût l'endroit de l'avion ou la phase de vol, des odeurs inhabituelles étaient le plus souvent rapportées. Des analyses de qualité d'air de l'avion étaient rapportées dans 7 événements, sans résultats disponibles.

Les 66 événements correspondaient à 112 personnes dont 96,4 % étaient des membres de l'équipage : 41,1 % d'hôtesse ou stewards, 32,1 % de pilotes et 23,2 % de personnel navigant sans précision. La plupart (92,9 %) a déclaré des symptômes, tous de faible gravité. Les symptômes neurologiques ou neuromusculaires étaient les plus fréquents (91,3 %), avec notamment des céphalées, des vertiges et des paresthésies. La seconde classe de symptômes la plus fréquemment rapportée était des signes digestifs (46,2 %) avec nausées, diarrhée et irritation buccale. Les symptômes respiratoires (39,4 %) comprenaient des douleurs oropharyngées, une irritation des voies aériennes supérieures et de la toux. Lorsque l'information était connue, dans la moitié des cas, l'évolution était toujours favorable.

Il est à noter que les CAP ne sont pas contactés de façon systématique et obligatoire lorsque de tels événements se produisent. Pour autant, dans cette étude, il n'a pas été constaté d'appels distincts provenant de personnes différentes ayant voyagé dans le même avion. Aucune circonstance particulière n'a été identifiée hormis le fait que ces situations étaient majoritairement rapportées par le personnel navigant et correspondaient le plus souvent à une odeur inhabituelle perçue. Les troubles de santé allégués étaient non spécifiques et sans gravité, ne se rattachant pas à un toxidrome connu. Enfin, dans certains cas, les personnes faisaient un lien entre les odeurs perçues et des émissions d'organophosphorés, sans qu'aucune analyse de qualité de l'air intérieur de l'avion ne permette de confirmer cette hypothèse. Or, en l'absence de marqueurs biologiques d'effets ou d'exposition pertinents, de telles analyses sont nécessaires pour objectiver une altération de la qualité de l'air de l'avion.

Sigles et abréviations

AChE	Acétylcholinestérase
BChE	Butyrylcholinestérase
BNCM	Base nationale des cas médicaux
BNPC	Base nationale des produits et compositions
CAP	Centre antipoison

GT	Groupe de travail
PN	Personnel navigant
PNC	Personnel navigant commercial
PNT	Personnel navigant technique
PSS	<i>Poisoning Severity Score</i>
RTU	Réponse téléphonique à l'urgence
SAC	Service des agents et compositions
SCM	Service des cas médicaux
SGT	Score de gravité en toxicovigilance
SICAP	Système d'information commun des centres antipoison
SID	Système d'information décisionnel

Table des illustrations et annexes

Liste des tableaux

Tableau CAP 1 : Description de l'évènement suite à une suspicion d'altération de la qualité de l'air en avion, rapportés aux CAP entre le 01/01/2000 et le 31/12/2021 (source : SICAP) ..	304
Tableau CAP 2 : Endroit de l'avion où étaient perçus les évènements suite à une suspicion d'altération de la qualité de l'air rapportés aux CAP entre le 01/01/2000 et le 31/12/2021 (source : SICAP)	304
Tableau CAP 3 : Phase de vol pendant laquelle ont été rapportées aux CAP les suspicions d'altération de la qualité d'air en avion entre le 01/01/2000 et le 31/12/2021 (source : SICAP)	305

Liste des figures

Figure CAP 1 : Répartition annuelle du nombre d'évènements rapportés aux CAP entre le 01/01/2000 et le 31/12/2021 suite à une suspicion d'altération de la qualité de l'air en avion (source : SICAP)	303
Figure CAP 2 : Type de personnes à l'origine des appels aux CAP suite à une suspicion d'altération de la qualité de l'air en avion, entre le 01/01/2000 et le 31/12/2021 (source : SICAP)	306
Figure CAP 3 : Fréquence des classes de symptômes suite à des suspicions d'altération de la qualité de l'air en avion rapportées aux CAP entre le 01/01/2000 et le 31/12/2021 (source : SICAP)	307

Liste des annexes

[Annexe 1 : Description des classes de symptômes et signes cliniques suite à des suspicions d'altération de la qualité d'air en avion rapportées aux CAP entre le 01/01/2000 et le 31/12/2021 \(source : SICAP\)](#)

22

7 Contexte, objet et modalités de réalisation de l'étude

7.1 Contexte et objectifs

Dans le cadre de la saisine 2019-SA-0075, l'Anses doit réaliser une expertise indépendante pour dresser l'état des connaissances sur les questions relatives à la qualité de l'air dans les cabines d'avion et à ses conséquences sur la santé, ainsi qu'un état des lieux des recommandations institutionnelles existantes sur les moyens d'action ou de prévention.

Afin de répondre à la question relative aux effets sur la santé du personnel navigant, l'exploitation de plusieurs bases de données a été décidée incluant celle des centres antipoison. C'est dans ce cadre qu'une étude de toxicovigilance a été requise.

7.2 Modalités de réalisation des travaux : moyens mis en œuvre et organisation

L'étude a été confiée au groupe de travail (GT) « Vigilance des produits chimiques » de l'Anses en septembre 2021 et a été validée en avril 2023. Deux experts rapporteurs médecins toxicologues, ne faisant pas partie de ce GT, ont été nommés pour la réalisation de cette étude.

Ces travaux sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires.

L'étude a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – prescriptions générales de compétence pour une expertise (mai 2003) ».

7.3 Prévention des risques de conflits d'intérêts

L'Anses analyse les liens d'intérêts déclarés par les experts avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'étude.

Les déclarations d'intérêts des experts sont publiées sur le site internet <https://dpi.sante.gouv.fr/>.

8 Matériel et méthodes

8.1 Schéma et période de l'étude

Il s'agit d'une étude rétrospective des cas rapportés au réseau des centres antipoison (CAP) entre le 1^{er} janvier 2000 et le 31 décembre 2021, suite à une suspicion d'altération de la qualité de l'air en avion.

8.2 Source de données : le système d'information des Centres antipoison (SICAP)

Le système d'information des CAP (SICAP) est composé du Service des agents et compositions (SAC) permettant la gestion de la base nationale des produits et compositions (BNPC), et du Service des cas médicaux (SCM) permettant la mise à jour de la Base nationale des cas médicaux (BNCM).

8.2.1 Base des agents

Les agents (mélanges, substances/ingrédients, classes d'agents, etc.) ont été recherchés dans la BNPC, thésaurus des agents ayant motivé une téléconsultation et/ou ceux faisant l'objet d'une obligation réglementaire de déclaration de composition. Il s'agit d'une base de données dynamique, mise à jour en permanence à partir des déclarations réglementaires ou spontanées des industriels et des réponses aux demandes spécifiques des CAP, conformément à l'article R.1340-7 du Code de la santé publique.

Les agents de la BNPC sont référencés dans des classes d'agents déterminées par une hiérarchie principale d'usage ainsi que des hiérarchies secondaires.

8.2.2 Base des cas

Les cas sont issus de la BNCM qui regroupe le dossier médical de chaque patient ayant fait l'objet d'un appel à un CAP. La BNCM comprend les données à caractère personnel recueillies et enregistrées par les CAP dans le cadre de leur mission de réponse téléphonique à l'urgence (RTU), dans le respect de la loi n°78-17 du 6 janvier 1978 modifiée relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés, du règlement (UE) n°2016/679 du 26 avril 2018 relatif à la protection des personnes physiques à l'égard du traitement des données à caractère personnel et à la libre circulation de ces données, et conformément à l'arrêté du 21 février 2022³¹ relatif au fonctionnement du SICAP. Pour les besoins de toxicovigilance, les CAP et l'Anses utilisent les données non nominatives du SICAP, interrogeable via un système d'information décisionnel dédié (SID).

Le cas échéant, des cas peuvent également être « hors RTU ». Il s'agit de cas notifiés aux CAP sans qu'ils ne soient contactés pour une téléconsultation médicale, de cas recherchés

³¹ L'arrêté du 21 février 2022 relatif au fonctionnement du SICAP définit ses conditions d'utilisation pour les besoins des Agences et des CAP.

spécifiquement dans les dossiers d'hospitalisation de façon proactive par le CAP ou de cas signalés via le portail des signalements³².

Les termes médicaux employés pour décrire les symptômes proviennent du thésaurus SnOMED 3.5³³ utilisé par les CAP.

Cas individuel : cas unique pour un évènement.

Cas groupé : au moins 2 cas liés au même évènement (au même moment et dans un même lieu). Des informations telles que l'âge ou le sexe par exemple, ne sont pas systématiquement renseignées pour tous les cas.

8.3 Définition et sélection des cas et évènements d'intérêt

Les cas d'intérêt correspondaient à une ou plusieurs personnes présentes dans un avion, que celui-ci soit au sol ou en vol, rapportant avoir perçu une odeur inhabituelle ou de la fumée, ou manifesté des symptômes ressentis comme étant en lien avec une altération de la qualité de l'air de l'avion. L'origine de cette altération était décrite comme provenant du fonctionnement de l'appareil.

Les évènements d'intérêt correspondaient à la situation décrite précédemment, sans tenir compte du nombre de personnes à l'origine de l'appel au CAP c'est-à-dire qu'un évènement d'intérêt pouvait correspondre à un cas individuel d'intérêt ou un cas groupé d'intérêt.

L'approche usuelle, qui consiste à croiser des éléments de contexte avec un ou des agents pertinents de la BNPC pour identifier les cas d'intérêt, n'a pas pu être retenue notamment devant la trop grande diversité possible de codage de l'agent qui, le plus souvent, est soit méconnu, soit allégué *a priori* (exemple : monoxyde de carbone, sans dosage biologique ou analyse de qualité de l'air confirmant cette hypothèse).

En conséquence, pour identifier les cas ou évènements d'intérêt, une recherche par mots-clés a été réalisée à partir du champ « commentaire » des dossiers médicaux. Cette recherche a porté sur les mots-clés suivants : « cabine », « aérottoxique/aerotoxique³⁴ », « pilote », « steward/steward », « hôtesse/hotesse ».

Après relecture de l'ensemble des cas, ont été exclus les doublons, les cas d'imputabilité nulle (cf. chapitre suivant), et les cas pour lesquels l'origine de l'altération de la qualité de l'air paraissait évidente et sans lien avec le fonctionnement de l'appareil (exemple : déclenchement accidentel d'extincteur à incendie).

³² https://signalement.social-sante.gouv.fr/psig_ihm_utilisateurs/index.html#/accueil

³³ <https://smt.esante.gouv.fr/terminologie-snomed-35vf/>

³⁴ Cf. rapport « Etat des connaissances sur la santé des personnels navigants et sur la qualité de l'air dans les cabines d'avion » - Anses, 2023

8.4 Méthodes d'évaluation des cas

8.4.1 Imputabilité

L'imputabilité est établie pour les cas symptomatiques selon la méthode d'imputabilité en toxicovigilance. Elle indique la force du lien causal entre un évènement et la survenue d'un effet de santé (symptôme, syndrome ou maladie). Elle comporte 5 niveaux :

- I0 : imputabilité nulle,
- I1 : imputabilité douteuse/non exclue,
- I2 : imputabilité possible,
- I3 : imputabilité probable,
- I4 : imputabilité très probable.

Dans le cadre de cette étude, l'imputabilité a été révisée pour les cas de gravité forte et moyenne par les experts rapporteurs.

8.4.2 Gravité

La gravité est évaluée selon la méthode d'évaluation de la gravité en toxicovigilance (SGT), adaptée du *Poisoning Severity Score* (PSS) pour les intoxications aiguës et de l'évaluation des séquelles via l'incapacité permanente partielle (IPP).

La gravité globale d'un cas correspond à la gravité la plus élevée des différents symptômes et/ou signes paracliniques du cas considérés un à un.

Le PSS comporte 5 niveaux :

- Niveau 0 : gravité nulle : absence de symptôme ou signe,
- Niveau 1 : gravité faible : symptômes ou signes mineurs, faibles, régressant spontanément,
- Niveau 2 : gravité moyenne : symptômes ou signes prononcés ou prolongés,
- Niveau 3 : gravité forte : symptômes ou signes sévères ou mettant en jeu le pronostic vital,
- Niveau 4 : décès.

La gravité du cas dans le SICAP est évaluée par le toxicologue qui prend en charge le cas.

Dans le cadre de cette étude, la gravité a été révisée pour les cas de gravité forte et moyenne par les experts rapporteurs.

8.4.3 Grille de relecture des cas

Les experts rapporteurs ont élaboré une grille de relecture des cas, renseignée par les informations contenues dans le champ « commentaires » du dossier.

Cette grille comportait des items complémentaires permettant de mieux caractériser les évènements et cas d'intérêt :

- description de l'évènement (exemple : odeur, fumée),
- endroit de l'avion (exemple : cockpit, cabine),
- phase de vol (exemple : au décollage, à l'atterrissage),
- réalisation d'analyses de qualité d'air de l'avion ou non et mesures réalisées telles que renseignées dans le dossier,
- type de personnes (exemple : passager, personnel navigant).

9 Résultats

9.1 Analyse des évènements

Du 1^{er} janvier 2000 au 31 décembre 2021, 66 évènements ont été retenus pour l'étude.

9.1.1 Évolution temporelle

L'évolution annuelle a montré une augmentation des évènements à partir de 2014 jusqu'en 2019, puis une diminution en 2020 et 2021 (Figure 1).

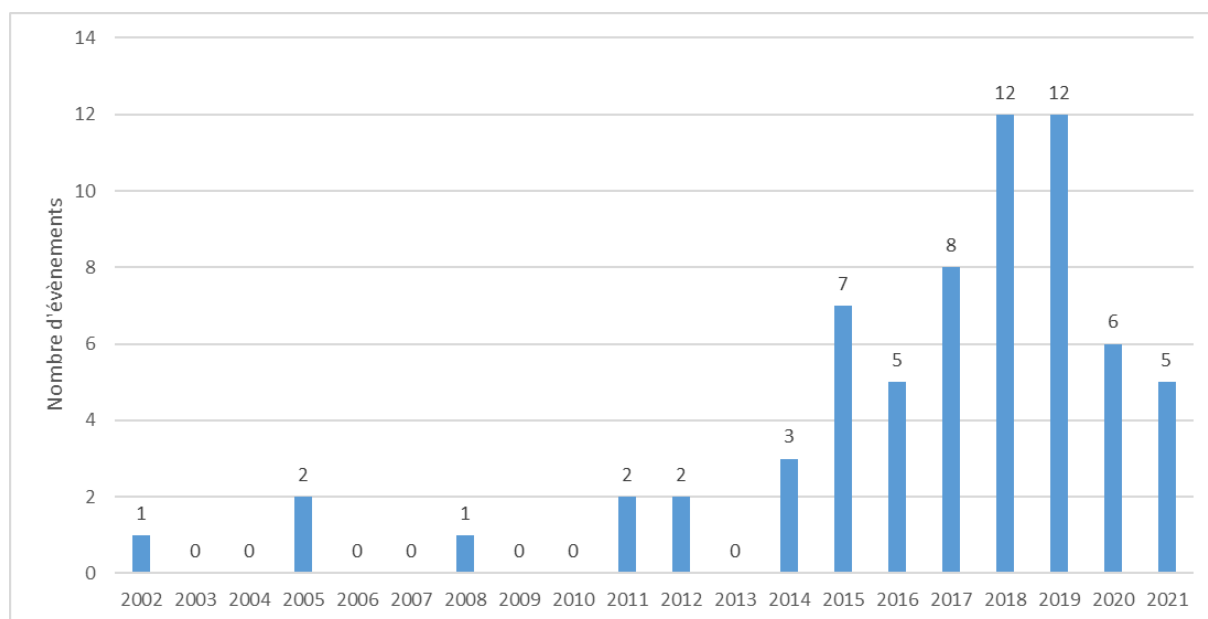


Figure CAP 1 : Répartition annuelle du nombre d'évènements rapportés aux CAP entre le 01/01/2000 et le 31/12/2021 suite à une suspicion d'altération de la qualité de l'air en avion (source : SICAP)

9.1.2 Description des évènements

L'évènement était décrit comme la perception, seule ou combinée, d'une odeur, de fumée ou de « vapeur/gaz ». Ainsi la perception d'une odeur inhabituelle dans l'avion était décrite dans presque un évènement sur deux (47,0 %, 31/66), de « vapeur/gaz » dans presque un quart des évènements (24,2 %, 16/66) et de fumée dans 19,7 % des évènements (13/66) (cf. Tableau 1).

Tableau CAP 1 : Description de l'évènement suite à une suspicion d'altération de la qualité de l'air en avion, rapportés aux CAP entre le 01/01/2000 et le 31/12/2021 (source : SICAP)

Type de perception	n	%
Odeur	24	36,4%
Vapeur/Gaz	11	16,7%
Fumée	9	13,6%
Vapeur/Gaz + odeur	4	6,1%
Fumée + odeur	3	4,5%
Vapeur/Gaz + fumée	1	1,5%
Non renseigné	14	21,2%
Total	66	100 %

Lorsque le détail de l'odeur perçue était noté dans le dossier (80,6 %, 25/31), elle était décrite principalement comme une odeur de « chaussettes mouillées » pour 8 évènements, de « kérosène » pour 4 évènements et d'« huile de moteur » pour 4 évènements.

9.1.3 Endroit de l'avion

Les endroits de l'avion où se situait la personne lors de la perception de l'évènement étaient renseignés dans plus de 71 % des cas (47/66) (cf. Tableau 2). Il s'agissait le plus souvent d'un évènement perçu dans le cockpit dans un tiers des évènements (33,3 %, 22/66), en cabine dans 30,3 % des évènements (20/66) et plus rarement dans la cabine et le cockpit simultanément (7,6 %, 5/66).

Tableau CAP 2 : Endroit de l'avion où étaient perçus les évènements suite à une suspicion d'altération de la qualité de l'air rapportés aux CAP entre le 01/01/2000 et le 31/12/2021 (source : SICAP)

Endroit de l'avion	n	%
Cockpit	22	32,3%
Cabine	15	22,7%
Cabine et cockpit	5	7,6%
Cabine arrière	4	6,1%
Cabine avant	1	1,5%
Non renseigné	19	28,8%
Total	66	100 %

Que l'évènement ait été perçu dans le cockpit ou dans la cabine, il s'agissait toujours principalement d'odeurs inhabituelles qui étaient rapportées (40,9 %, 10/22 pour le cockpit ; 70,0 %, 14/20 pour la cabine).

Lorsque l'information était renseignée, la durée pendant laquelle était perçu le phénomène variait de quelques secondes à plusieurs vols successifs.

9.1.4 Phase de vol

La phase de vol pendant laquelle l'évènement était perçu était connue dans 69,7 % des cas (46/66). En majorité, il était perçu à différents moments d'un même vol, du départ à l'arrivée de l'avion (27,3 %, 18/66) (cf. Tableau 3). Il pouvait être perçu uniquement pendant une phase

de vol : pendant la croisière dans 19,7 % des évènements (13/66), et moins fréquemment pendant l'atterrissage (12,1 %, 8/66) ou le décollage (4,5 %, 3/66).

Tableau CAP 3 : Phase de vol pendant laquelle ont été rapportées aux CAP les suspicions d'altération de la qualité d'air en avion entre le 01/01/2000 et le 31/12/2021 (source : SICAP)

Phase de vol	n	%
Multiple (du départ à l'arrivée)	18	27,3%
Phase de croisière	13	19,7%
Phase d'atterrissage (descente et atterrissage)	8	12,1%
Roulage sur le tarmac ou à l'arrêt	4	6,1%
Phase de décollage (décollage et montée)	3	4,5%
Non renseignée	20	30,3%
Total	66	100 %

Quelle que fût la phase de vol rapportée dans les dossiers, il n'y avait pas de spécificité particulière de perception de l'évènement. Dans toutes ces situations, des odeurs inhabituelles étaient le plus souvent rapportées.

9.1.5 Analyses de qualité de l'air de l'avion

La réalisation d'investigations analytiques de qualité de l'air de l'avion était déclarée dans 7 évènements, sans résultats disponibles. Il était mentionné la recherche d'orthocrétylphosphate pour 1 évènement, et de composés phosphorés pour 1 évènement détecté dans la soute de l'avion mais pas dans la cabine.

9.2 Analyse des cas

Les 66 évènements correspondaient à 112 personnes :

- 44 cas individuels : une personne a fait l'objet de l'appel au CAP en rapportant un évènement qui a pu concerner d'autres personnes sans information sur celles-ci,
- 22 cas groupés : de 2 à 6 personnes concernées (dans ces cas, un seul appel au CAP faisait référence à l'ensemble des personnes concernées) par un même évènement ont fait l'objet d'une sollicitation d'un CAP.

9.2.1 Âge et sex-ratio

Parmi les 112 personnes, 28 étaient des femmes et 60 des hommes (sex-ratio H/F = 2,1). Le sexe n'était pas renseigné pour 21,4 % des cas (24/112).

L'âge était connu pour 75 personnes (données manquantes pour 33,0 % des cas, 37/112) et allait de 4 à 58 ans (moyenne : 39 ; médiane : 40).

9.2.2 Type de personnes

Dans 96,4 % des cas (108/112), les personnes étaient des membres de l'équipage : 41,1 % de PNC (personnel navigant commercial, c'est-à-dire les hôtesses de l'air et les stewards – 46/112), 32,1 % de PNT (personnel navigant technique, c'est-à-dire les pilotes – 36/112) et

23,2 % de PN (personnel navigant – 26/112) sans précision. Etaient comptés trois passagers et une personne sans précision.

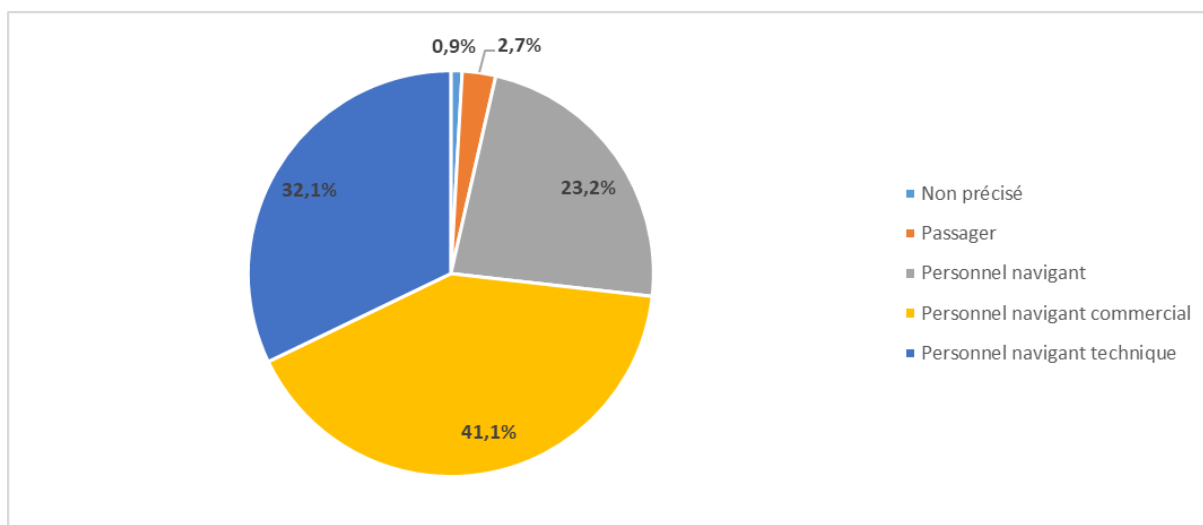


Figure CAP 2 : Type de personnes à l'origine des appels aux CAP suite à une suspicion d'altération de la qualité de l'air en avion, entre le 01/01/2000 et le 31/12/2021 (source : SICAP)

9.2.3 Description des symptômes

Parmi les 112 personnes, 92,9 % (104/112) ont déclaré des symptômes suite à la suspicion d'altération de la qualité d'air dans l'avion, tous de gravité faible.

Les symptômes listés ci-dessous correspondaient aux symptômes codés dans le dossier à partir des éléments rapportés par l'appelant (cf. Figure 3). L'ensemble des signes cliniques et symptômes rapportés est présenté en Annexe 1.

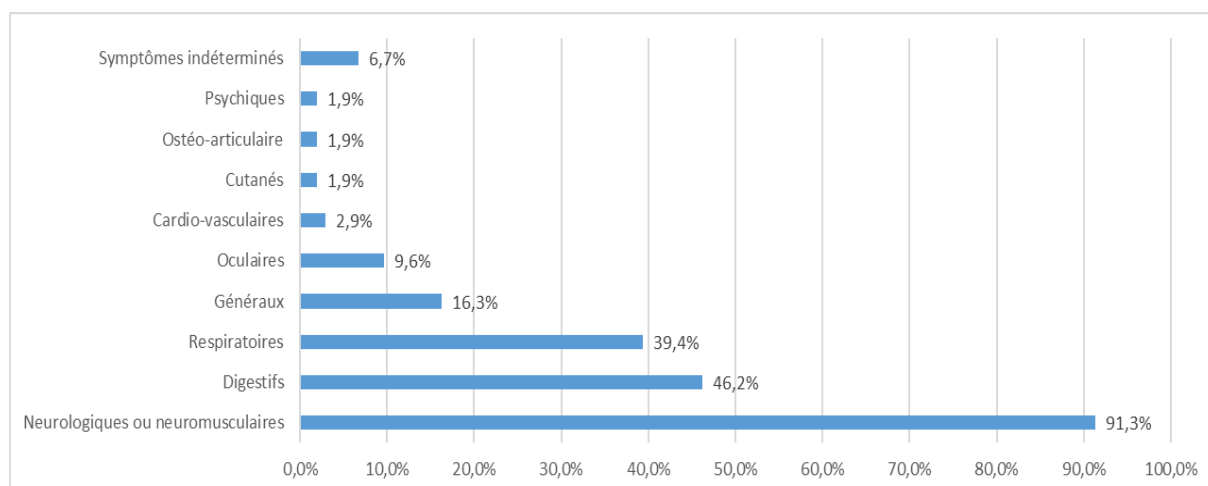
Les symptômes neurologiques ou neuromusculaires étaient les plus fréquents (91,3 % des cas – 95/104) dont près de la moitié était des céphalées (49,0 %). Les autres symptômes étaient des vertiges (21,2 %), des paresthésies (13,5 %) et une dysgueusie (2,9 %).

La seconde classe de symptômes la plus fréquemment rapportée était des signes digestifs (46,2 % - 48/104) : nausées (19,2 %), diarrhée (6,7 %), irritation buccale (5,8 %), sécheresse de la bouche (4,8 %).

Les symptômes respiratoires (39,4 % - 41/104) comprenaient des douleurs oropharyngées (12,5 %), une irritation des voies aériennes supérieures (10,6 %), une toux (6,7 %) et des douleurs respiratoires (3,8 %).

Les autres classes de symptômes les plus fréquemment rapportés étaient des signes généraux pour 16,3 % (asthénie, malaise), oculaires pour 9,6 % (douleurs oculaires, conjonctivite).

Pour 6,7 % des cas, les symptômes n'étaient pas précisés (les personnes ont rapporté avoir manifesté des symptômes sans plus de précision dans le dossier).



Le total des pourcentages dépasse 100 %, dans la mesure où certaines personnes présentaient plusieurs symptômes de la même classe et de classes différentes.

Figure CAP 3 : Fréquence des classes de symptômes suite à des suspicions d'altération de la qualité de l'air en avion rapportées aux CAP entre le 01/01/2000 et le 31/12/2021 (source : SICAP)

Lorsque l'information était connue (50,0 % des cas), l'évolution était toujours favorable.

10 Discussion

L'exploitation des données des CAP a permis de mettre en évidence 66 évènements correspondant à des situations d'altération suspectée de la qualité de l'air dans des avions, rapportées par une ou plusieurs personnes. En premier lieu, il est à noter que les CAP ne sont pas contactés de façon systématique et obligatoire lorsque de tels évènements se produisent. En effet, le cadre général de la mission des CAP s'applique sans aucune obligation de signaler ou de prendre un avis médical pour les intoxications qui peuvent survenir.

Par ailleurs, la cabine d'un avion étant un espace clos, chaque cas individuel pourrait être considéré comme le témoin d'un évènement collectif. Or il n'a pas été constaté d'appels distincts pour un même évènement, c'est-à-dire d'appels distincts de personnes différentes ayant voyagé dans le même avion.

Une augmentation des appels aux CAP était observée à partir de 2014 jusqu'en 2018 et 2019. Cette évolution pourrait refléter une augmentation des situations à l'origine d'une altération de la qualité d'air en avion, ou être expliquée par sensibilisation accrue des PN à ces situations aboutissant à un recours médical plus fréquent. Cette sensibilisation a pu se faire, par exemple, à travers la médiatisation d'une action judiciaire engagée par deux PNT revendiquant des troubles de santé en lien avec la qualité de l'air des avions³⁵. La diminution des évènements rapportés aux CAP en 2020 et 2021 est possiblement liée à la réduction des vols en avion pendant la pandémie de Covid-19.

Les évènements correspondaient à des descriptions variables concernant la phase de vol ou l'endroit de l'avion. Lorsque les données étaient renseignées, il s'agissait majoritairement de PN ayant rapporté avoir perçu une odeur inhabituelle, le plus souvent de « chaussettes mouillées ». Dans certains cas, les personnes qui contactaient le CAP alléguaient un lien entre les odeurs ressenties et des émissions d'organophosphorés, en particulier d'orthocrésylphosphate s le système de circulation d'air, sans qu'aucune donnée de mesures de qualité de l'air de l'avion ne permette d'objectiver la présence de ces substances et de confirmer cette hypothèse. Les agents codés pour ces dossiers étaient également peu informatifs en raison de l'imprécision des données alléguées par les appelants ou, là encore, de l'absence de résultats de mesures de la qualité de l'air dans les avions. En l'absence de ces résultats, les allégations d'une altération de la qualité de l'air dans les avions n'ont pas été objectivées.

La plupart des 112 personnes impliquées ont présenté des symptômes. Ces symptômes étaient peu spécifiques, de faible gravité et d'évolution favorable lorsqu'elle était connue. Aucun toxidrome³⁶ connu ne pouvait être rattaché aux troubles allégués par les personnes à l'origine des appels aux CAP.

³⁵ https://www.francetvinfo.fr/economie/emploi/carriere/vie-professionnelle/sante-au-travail/deux-pilotes-americains-se-disent-victimes-du-syndrome-aerotoxique-et-engagent-une-procedure-contre-airbus_2733439.html

³⁶ Un toxidrome ou syndrome d'origine toxique est un ensemble de signes et de symptômes qui caractérisent une intoxication par une classe spécifique de substances toxiques. Ces signes et

Compte tenu des causes supposées de ces altérations de la qualité de l'air en avion notamment par la présence supposée d'organophosphorés ou d'orthocrésylphosphate, les CAP étaient parfois contactés pour apporter un avis toxicologique sur la pertinence de réaliser des dosages biologiques de l'activité de l'acétylcholinestérase (AChE) érythrocytaire et/ou de la butyrylcholinestérase (BChE) plasmatique, devant une possible exposition au tricrésylphosphate. L'activité de la BChE est un biomarqueur utile pour le suivi des travailleurs exposés aux inhibiteurs de cholinestérases, notamment des organophosphorés. Toutefois, en raison d'une grande variabilité inter et intra-individuelle, l'interprétation d'un résultat n'est possible que si l'on dispose pour la même personne d'au moins deux analyses antérieures en situation de non exposition. De plus, l'effet inhibiteur des cholinestérases du tricrésylphosphate est faible ou modéré (Aldridge, 1954 ; Delacour *et al.*, 2019 ; IPCS, 1990). Ainsi, un résultat d'activité de la BChE, qui plus est sans analyses de qualité d'air, reste très difficile à interpréter.

symptômes sont la conséquence directe de l'action de ces substances sur des récepteurs ou des protéines spécifiques.

11 Conclusion

L'étude des cas supposés d'altération de la qualité de l'air en avion connus des centres antipoison entre le 1^{er} janvier 2000 au 31 décembre 2021, a mis en évidence 66 évènements impliquant 112 personnes, avec une augmentation des cas rapportés à partir de 2014.

Aucune circonstance particulière n'a été identifiée à partir des dossiers, hormis le fait que ces situations concernaient majoritairement le personnel navigant. Les évènements étaient perçus le plus souvent par une odeur inhabituelle dans le cockpit ou dans la cabine. Aucune documentation métrologique d'une altération de la qualité de l'air dans l'avion n'était disponible. Les troubles de santé étaient non spécifiques, de faible gravité et ne se rattachaient pas à un toxidrome connu.

Les données disponibles dans les dossiers, relatives aux circonstances de survenue des évènements et à l'état de santé des personnes concernées, n'ont pas permis de déterminer la cause de ces évènements faute de résultats d'analyses d'air. Or, en l'absence de marqueurs biologiques d'effets ou d'exposition pertinents, de telles analyses sont nécessaires pour objectiver une altération de la qualité de l'air de l'avion.

12 Bibliographie

Aldridge WN. Tricresyl phosphates and cholinesterase. *Biochem J.* 1954 Feb;56(2):185-9.

Delacour H. Ferrand J-F., Servonnet A., Ceppia F., Guillon V., Dorandeu F. Déficit en butyrylcholinestérase et suivi des professionnels exposés à des inhibiteurs de cholinestérase. *Médecine et armées*, 2019 ; 47(3) : 259-262.

International Program on Chemical Safety (IPCS). Tricresyl phosphate. Environmental Health Criteria 110. OMS. 1990. www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc110.htm

NF X 50-110. 2003. Qualité en expertise – Prescriptions générales de compétence pour une expertise. AFNOR (indice de classement X 50-110)

Annexe 1 : Description des classes de symptômes et signes cliniques suite à des suspicions d'altération de la qualité d'air en avion rapportées aux CAP entre le 01/01/2000 et le 31/12/2021 (source : SICAP)

Classes de symptômes et signes cliniques associés	N*	%*
Neurologiques ou neuromusculaires	95	91,3%
Céphalées	51	49,0%
Vertiges	22	21,2%
Paresthésie	14	13,5%
Dysgueusie	3	2,9%
Tremblements des extrémités	2	1,9%
Autre signe neurologique	1	1,0%
Confusion mentale	1	1,0%
Tremblements généralisés	1	1,0%
Digestifs	48	46,2%
Nausées	20	19,2%
Diarrhée	7	6,7%
Irritation buccale	6	5,8%
Sécheresse de la bouche	5	4,8%
Douleur abdominale basse	4	3,8%
Vomissements	4	3,8%
Anorexie	1	1,0%
Douleur abdominale mal localisée	1	1,0%
Respiratoires	41	39,4%
Douleur oropharyngée	13	12,5%
Irritation des voies aériennes supérieures	11	10,6%
Toux	7	6,7%
Douleur respiratoire	4	3,8%
Dyspnée	2	1,9%
Gêne respiratoire non précisée	2	1,9%
Rhinorrhée	1	1,0%
Ulcération laryngée	1	1,0%
Généraux	17	16,3%
Asthénie	11	10,6%
Malaise	6	5,8%

Oculaires	10	9,6%
Douleur oculaire	5	4,8%
Conjonctivite	2	1,9%
Vision brouillée	2	1,9%
Vision anormale	1	1,0%
Cardio-vasculaires	3	2,9%
Tachycardie sinusale non précisée	2	1,9%
Hypertension artérielle	1	1,0%
Cutanés	2	1,9%
Erythème	1	1,0%
Dermatite séborrhéique	1	1,0%
Ostéo-articulaire	2	1,9%
Limitation de la mobilité articulaire	1	1,0%
Ostéo-articulaire : autre signe	1	1,0%
Psychiques	2	1,9%
Sensation d'étourdissement	1	1,0%
Ebriété	1	1,0%
Symptômes indéterminés	7	6,7%

*nombre et pourcentage de cas, parmi les 104 cas ayant présenté au moins un symptôme de la classe

Annexe 11. Requêtes bibliographiques relatives à la partie Effets sur la santé liés à la profession de personnels navigants

	Base	Equation	Date dernière mise à jour	Nombre résultats
Requête principale - revue	Scopus®	TITLE-ABS-KEY ((aircraft OR flight OR airplane OR cockpit OR airliner) AND (health OR outcomes OR disease OR mortality OR morbidity OR epidemiolog* OR associat* OR toxicolog* OR "risk assessment") AND (passenger OR traveler OR "crew member*" OR aircrew OR "flight crew*" OR pilot OR "flight attendant" OR aviator OR "frequent flyer") AND NOT ("space flight" OR "space travel" OR spacecraft OR "space station" OR spaceflight OR helicopter)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "re") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "ch") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "bk"))	31/12/2022	837
Troubles mentaux	Scopus®	TITLE-ABS-KEY ((aircraft OR flight OR airplane OR cockpit OR airliner) AND ("mental illness" OR anxiety OR depression OR stress OR "mental health" OR "psychosocial health" OR fatigue OR "sleep disorder") AND ("crew member*" OR aircrew OR "flight crew*" OR pilot OR "flight attendant" OR aviator OR "frequent flyer")) AND NOT ("space flight" OR "space travel" OR spacecraft OR "space station" OR spaceflight OR helicopter)	31/12/2022	2162
Thrombose personnel navigant	Scopus®	TITLE-ABS-KEY ((aircraft OR flight OR airplane OR cockpit OR airliner) AND (thrombosis) AND ("crew member*" OR aircrew OR "flight crew*" OR pilot OR "flight attendant" OR aviator OR "frequent flyer")) AND NOT ("space flight" OR "space travel" OR spacecraft OR "space station" OR spaceflight OR helicopter)	31/12/2022	49

Neuropathies	Scopus®	TITLE-ABS-KEY ((aircraft OR flight OR airplane OR cockpit OR airliner) AND (neuropathy OR neurologic*) AND ("crew member*" OR aircrew OR "flight crew*" OR pilot OR "flight attendant" OR aviator OR "frequent flyer")) AND NOT ("space flight" OR "space travel" OR spacecraft OR "space station" OR spaceflight OR helicopter)	31/12/2022	182
TMS	Scopus®	TITLE-ABS-KEY ((aircraft OR flight OR airplane OR cockpit OR airliner) AND (Musculat*) AND ("crew member*" OR aircrew OR "flight crew*" OR pilot OR "flight attendant" OR aviator OR "frequent flyer")) AND NOT ("space flight" OR "space travel" OR spacecraft OR "space station" OR spaceflight OR helicopter)	31/12/2022	6
Système endocrinien	Scopus®	TITLE-ABS-KEY ((aircraft OR flight OR airplane OR cockpit OR airliner) AND (endocrin*) AND ("crew member*" OR aircrew OR "flight crew*" OR pilot OR "flight attendant" OR aviator OR "frequent flyer")) AND NOT ("space flight" OR "space travel" OR spacecraft OR "space station" OR spaceflight OR helicopter)	31/12/2022	22
Système respiratoire	Scopus®	TITLE-ABS-KEY ((aircraft OR flight OR airplane OR cockpit OR airliner) AND (respiratory) AND ("crew member*" OR aircrew OR "flight crew*" OR pilot OR "flight attendant" OR aviator OR "frequent flyer")) AND NOT ("space flight" OR "space travel" OR spacecraft OR "space station" OR spaceflight OR helicopter)	31/12/2022	315
Reproduction féminine	Scopus®	TITLE-ABS-KEY ((aircraft OR flight OR airplane OR cockpit OR airliner) AND (pregnancy) AND ("crew member*" OR aircrew OR "flight crew*" OR pilot OR "flight attendant" OR aviator OR "frequent flyer")) AND NOT ("space flight" OR "space travel" OR spacecraft OR "space station" OR spaceflight OR helicopter)	31/12/2022	83

Système cardiovasculaire	Scopus®	TITLE-ABS-KEY ((aircraft OR flight OR airplane OR cockpit OR airliner) AND (cardiovascular) AND ("crew member*" OR aircrew OR "flight crew*" OR pilot OR "flight attendant" OR aviator OR "frequent flyer")) AND NOT ("space flight" OR "space travel" OR spacecraft OR "space station" OR spaceflight OR helicopter)	31/12/2022	465
Cancer	Scopus®	TITLE-ABS-KEY ((aircraft OR flight OR airplane OR cockpit OR airliner) AND (cancer) AND ("crew member*" OR aircrew OR "flight crew*" OR pilot OR "flight attendant" OR aviator OR "frequent flyer")) AND NOT ("space flight" OR "space travel" OR spacecraft OR "space station" OR spaceflight OR helicopter)	31/12/2022	320
Requête principale - revue	PubMed®	("cockpit"[All Fields] OR "airliner"[All Fields] OR ("aircraft"[MeSH Terms] OR "aircraft"[All Fields] OR "aeroplane"[All Fields] OR "aeroplanes"[All Fields] OR "aircrafts"[All Fields] OR "airplane"[All Fields] OR "airplanes"[All Fields] OR "aircraft s"[All Fields] OR ("aircraft"[MeSH Terms] OR "aircraft"[All Fields] OR "aeroplane"[All Fields] OR "aeroplanes"[All Fields] OR "aircrafts"[All Fields] OR "airplane"[All Fields] OR "airplanes"[All Fields] OR "aircraft s"[All Fields]) OR ("flight"[All Fields] OR "flighted"[All Fields] OR "flights"[All Fields])) AND ("health"[MeSH Terms] OR "health"[All Fields] OR "health s"[All Fields] OR "healthful"[All Fields] OR "healthfulness"[All Fields] OR "healths"[All Fields] OR ("outcome"[All Fields] OR "outcomes"[All Fields]) OR ("disease"[MeSH Terms] OR "disease"[All Fields] OR "diseases"[All Fields] OR "disease s"[All Fields] OR "diseased"[All Fields]) OR ("mortality"[MeSH Terms] OR "mortality"[All Fields] OR "mortalities"[All Fields] OR	31/12/2022	552

		("thombosis"[All Fields] AND ("aircrew"[All Fields] OR "aircrews"[All Fields] OR "crew member"[All Fields] OR "flight crew"[All Fields] OR ("pilot s"[All Fields] OR "piloted"[All Fields] OR "piloting"[All Fields] OR "pilots"[MeSH Terms] OR "pilots"[All Fields] OR "pilot"[All Fields]) OR "flight attendant"[All Fields] OR ("passenger"[All Fields] OR "passenger s"[All Fields] OR "passengers"[All Fields]) OR ("travel"[MeSH Terms] OR "travel"[All Fields] OR "traveling"[All Fields] OR "travelling"[All Fields] OR "travels"[All Fields] OR "traveled"[All Fields] OR "traveler"[All Fields] OR "traveler s"[All Fields] OR "travelers"[All Fields] OR "travelled"[All Fields] OR "traveller"[All Fields] OR "traveller s"[All Fields] OR "travellers"[All Fields])) OR "frequent flyer"[All Fields]) NOT "space flight"[MeSH Terms]		
Troubles mentaux	PubMed®	((("cockpit"[All Fields] OR "airliner"[All Fields] OR ("aircraft"[MeSH Terms] OR "aircraft"[All Fields] OR "aeroplane"[All Fields] OR "aeroplanes"[All Fields] OR "aircrafts"[All Fields] OR "airplane"[All Fields] OR "airplanes"[All Fields] OR "aircraft s"[All Fields] OR ("aircraft"[MeSH Terms] OR "aircraft"[All Fields] OR "aeroplane"[All Fields] OR "aeroplanes"[All Fields] OR "aircrafts"[All Fields] OR "airplane"[All Fields] OR "airplanes"[All Fields] OR "aircraft s"[All Fields]) OR ("flight"[All Fields] OR "flighted"[All Fields] OR "flights"[All Fields])) AND ("aircrew"[All Fields] OR "aircrews"[All Fields] OR "crew member"[All Fields] OR "flight crew"[All Fields] OR ("pilot s"[All Fields] OR "piloted"[All Fields] OR "piloting"[All Fields] OR "pilots"[MeSH Terms] OR "pilots"[All Fields] OR "pilot"[All Fields]) OR "flight attendant"[All Fields] OR ("passenger"[All Fields] OR	31/12/2022	1528

		"passenger s"[All Fields] OR "passengers"[All Fields] OR ("travel"[MeSH Terms] OR "travel"[All Fields] OR "traveling"[All Fields] OR "travelling"[All Fields] OR "travels"[All Fields] OR "traveled"[All Fields] OR "traveler"[All Fields] OR "traveler s"[All Fields] OR "travelers"[All Fields] OR "travelled"[All Fields] OR "traveller"[All Fields] OR "traveller s"[All Fields] OR "travellers"[All Fields])) OR "frequent flyer"[All Fields] AND ((mental illness) OR (anxiety) OR (depression) OR (stress) OR (mental health) OR (psychosocial health) OR (fatigue) OR (sleep disorder)) NOT "space flight"[MeSH Terms]		
Neuropathies	PubMed®	((("cockpit"[All Fields] OR "airliner"[All Fields] OR ("aircraft"[MeSH Terms] OR "aircraft"[All Fields] OR "aeroplane"[All Fields] OR "aeroplanes"[All Fields] OR "aircrafts"[All Fields] OR "airplane"[All Fields] OR "airplanes"[All Fields] OR "aircraft s"[All Fields] OR ("aircraft"[MeSH Terms] OR "aircraft"[All Fields] OR "aeroplane"[All Fields] OR "aeroplanes"[All Fields] OR "aircrafts"[All Fields] OR "airplane"[All Fields] OR "airplanes"[All Fields] OR "aircraft s"[All Fields]) OR ("flight"[All Fields] OR "flighted"[All Fields] OR "flights"[All Fields])) AND ("aircrew"[All Fields] OR "aircrews"[All Fields] OR "crew member"[All Fields] OR "flight crew"[All Fields] OR ("pilot s"[All Fields] OR "piloted"[All Fields] OR "piloting"[All Fields] OR "pilots"[MeSH Terms] OR "pilots"[All Fields] OR "pilot"[All Fields]) OR "flight attendant"[All Fields] OR ("passenger"[All Fields] OR "passenger s"[All Fields] OR "passengers"[All Fields]) OR ("travel"[MeSH Terms] OR "travel"[All Fields] OR "traveling"[All Fields] OR "travelling"[All Fields] OR "travels"[All Fields] OR "traveled"[All Fields] OR "traveler"[All Fields] OR "traveler	31/12/2022	204

		s"[All Fields] OR "travelers"[All Fields] OR "travelled"[All Fields] OR "traveller"[All Fields] OR "travellers"[All Fields] OR "travellers"[All Fields])) OR "frequent flyer"[All Fields] AND (neuropathy OR neurologic*) NOT "space flight"[MeSH Terms]		
TMS	PubMed®	(("cockpit"[All Fields] OR "airliner"[All Fields] OR ("aircraft"[MeSH Terms] OR "aircraft"[All Fields] OR "aeroplane"[All Fields] OR "aeroplanes"[All Fields] OR "aircrafts"[All Fields] OR "airplane"[All Fields] OR "airplanes"[All Fields] OR "aircraft s"[All Fields] OR ("aircraft"[MeSH Terms] OR "aircraft"[All Fields] OR "aeroplane"[All Fields] OR "aeroplanes"[All Fields] OR "aircrafts"[All Fields] OR "airplane"[All Fields] OR "airplanes"[All Fields] OR "aircraft s"[All Fields]) OR ("flight"[All Fields] OR "flighted"[All Fields] OR "flights"[All Fields])) AND ("aircrew"[All Fields] OR "aircrews"[All Fields] OR "crew member"[All Fields] OR "flight crew"[All Fields] OR ("pilot s"[All Fields] OR "piloted"[All Fields] OR "piloting"[All Fields] OR "pilots"[MeSH Terms] OR "pilots"[All Fields] OR "pilot"[All Fields]) OR "flight attendant"[All Fields] OR ("passenger"[All Fields] OR "passenger s"[All Fields] OR "passengers"[All Fields]) OR ("travel"[MeSH Terms] OR "travel"[All Fields] OR "traveling"[All Fields] OR "travelling"[All Fields] OR "travels"[All Fields] OR "traveled"[All Fields] OR "traveler"[All Fields] OR "traveler s"[All Fields] OR "travelers"[All Fields] OR "travelled"[All Fields] OR "traveller"[All Fields] OR "travellers"[All Fields] OR "travellers"[All Fields])) OR "frequent flyer"[All Fields] AND (musculo*) NOT "space flight"[MeSH Terms]	31/12/2022	68
Système endocrinien	PubMed®	(("cockpit"[All Fields] OR "airliner"[All Fields] OR ("aircraft"[MeSH Terms] OR "aircraft"[All Fields] OR "aeroplane"[All Fields] OR "aeroplanes"[All Fields] OR "aircrafts"[All Fields] OR "airplane"[All Fields] OR "airplanes"[All Fields] OR "aircraft s"[All Fields]) OR ("flight"[All Fields] OR "flighted"[All Fields] OR "flights"[All Fields])) AND ("aircrew"[All Fields] OR "aircrews"[All Fields] OR "crew member"[All Fields] OR "flight crew"[All Fields] OR ("pilot s"[All Fields] OR "piloted"[All Fields] OR "piloting"[All Fields] OR "pilots"[MeSH Terms] OR "pilots"[All Fields] OR "pilot"[All Fields]) OR "flight attendant"[All Fields] OR ("passenger"[All Fields] OR "passenger s"[All Fields] OR "passengers"[All Fields]) OR ("travel"[MeSH Terms] OR "travel"[All Fields] OR "traveling"[All Fields] OR "travelling"[All Fields] OR "travels"[All Fields] OR "traveled"[All Fields] OR "traveler"[All Fields] OR "traveler s"[All Fields] OR "travelers"[All Fields] OR "travelled"[All Fields] OR "traveller"[All Fields] OR "travellers"[All Fields] OR "travellers"[All Fields])) OR "frequent flyer"[All Fields] AND (musculo*) NOT "space flight"[MeSH Terms]	31/12/2022	49

		<p>"aeroplane"[All Fields] OR "aeroplanes"[All Fields] OR "aircrafts"[All Fields] OR "airplane"[All Fields] OR "airplanes"[All Fields] OR "aircraft s"[All Fields] OR ("aircraft"[MeSH Terms] OR "aircraft"[All Fields] OR "aeroplane"[All Fields] OR "aeroplanes"[All Fields] OR "aircrafts"[All Fields] OR "airplane"[All Fields] OR "airplanes"[All Fields] OR "aircraft s"[All Fields]) OR ("flight"[All Fields] OR "flighted"[All Fields] OR "flights"[All Fields])) AND ("aircrew"[All Fields] OR "aircrews"[All Fields] OR "crew member"[All Fields] OR "flight crew"[All Fields] OR ("pilot s"[All Fields] OR "piloted"[All Fields] OR "piloting"[All Fields] OR "pilots"[MeSH Terms] OR "pilots"[All Fields] OR "pilot"[All Fields]) OR "flight attendant"[All Fields] OR ("passenger"[All Fields] OR "passenger s"[All Fields] OR "passengers"[All Fields]) OR ("travel"[MeSH Terms] OR "travel"[All Fields] OR "traveling"[All Fields] OR "travelling"[All Fields] OR "travels"[All Fields] OR "traveled"[All Fields] OR "traveler"[All Fields] OR "traveler s"[All Fields] OR "travelers"[All Fields] OR "travelled"[All Fields] OR "traveller"[All Fields] OR "traveller s"[All Fields] OR "travellers"[All Fields])) OR "frequent flyer"[All Fields]) AND (endocrin*) NOT "space flight"[MeSH Terms]</p>		
Système respiratoire	PubMed®	<p>(("cockpit"[All Fields] OR "airliner"[All Fields] OR ("aircraft"[MeSH Terms] OR "aircraft"[All Fields] OR "aeroplane"[All Fields] OR "aeroplanes"[All Fields] OR "aircrafts"[All Fields] OR "airplane"[All Fields] OR "airplanes"[All Fields] OR "aircraft s"[All Fields] OR ("aircraft"[MeSH Terms] OR "aircraft"[All Fields] OR "aeroplane"[All Fields] OR "aeroplanes"[All Fields] OR "aircrafts"[All Fields] OR "airplane"[All Fields] OR "airplanes"[All Fields] OR</p>	31/12/2022	499

		"aircraft s"[All Fields]) OR ("flight"[All Fields] OR "flighted"[All Fields] OR "flights"[All Fields])) AND ("aircrew"[All Fields] OR "aircrews"[All Fields] OR "crew member"[All Fields] OR "flight crew"[All Fields] OR ("pilot s"[All Fields] OR "piloted"[All Fields] OR "piloting"[All Fields] OR "pilots"[MeSH Terms] OR "pilots"[All Fields] OR "pilot"[All Fields]) OR "flight attendant"[All Fields] OR ("passenger"[All Fields] OR "passenger s"[All Fields] OR "passengers"[All Fields]) OR ("travel"[MeSH Terms] OR "travel"[All Fields] OR "traveling"[All Fields] OR "travelling"[All Fields] OR "travels"[All Fields] OR "traveled"[All Fields] OR "traveler"[All Fields] OR "traveler s"[All Fields] OR "travelers"[All Fields] OR "travelled"[All Fields] OR "traveller"[All Fields] OR "traveller s"[All Fields] OR "travellers"[All Fields])) OR "frequent flyer"[All Fields]) AND (respiratory) NOT "space flight"[MeSH Terms]		
Reproduction féminine	PubMed®	((("cockpit"[All Fields] OR "airliner"[All Fields] OR "aircraft"[MeSH Terms] OR "aircraft"[All Fields] OR "aeroplane"[All Fields] OR "aeroplanes"[All Fields] OR "aircrafts"[All Fields] OR "airplane"[All Fields] OR "airplanes"[All Fields] OR "aircraft s"[All Fields] OR ("aircraft"[MeSH Terms] OR "aircraft"[All Fields] OR "aeroplane"[All Fields] OR "aeroplanes"[All Fields] OR "aircrafts"[All Fields] OR "airplane"[All Fields] OR "airplanes"[All Fields] OR "aircraft s"[All Fields]) OR ("flight"[All Fields] OR "flighted"[All Fields] OR "flights"[All Fields])) AND ("aircrew"[All Fields] OR "aircrews"[All Fields] OR "crew member"[All Fields] OR "flight crew"[All Fields] OR ("pilot s"[All Fields] OR "piloted"[All Fields] OR "piloting"[All Fields] OR "pilots"[MeSH Terms] OR "pilots"[All Fields] OR "pilot"[All Fields]) OR "flight	138	31/12/2022

		<p>attendant"[All Fields] OR ("passenger"[All Fields] OR "passenger s"[All Fields] OR "passengers"[All Fields]) OR ("travel"[MeSH Terms] OR "travel"[All Fields] OR "traveling"[All Fields] OR "travelling"[All Fields] OR "travels"[All Fields] OR "traveled"[All Fields] OR "traveler"[All Fields] OR "traveler s"[All Fields] OR "travelers"[All Fields] OR "travelled"[All Fields] OR "traveller"[All Fields] OR "traveller s"[All Fields] OR "travellers"[All Fields])) OR "frequent flyer"[All Fields]) AND (pregnancy) NOT "space flight"[MeSH Terms]</p>		
Systeme cardiovasculaire	PubMed®	<p>((("cockpit"[All Fields] OR "airliner"[All Fields] OR ("aircraft"[MeSH Terms] OR "aircraft"[All Fields] OR "aeroplane"[All Fields] OR "aeroplanes"[All Fields] OR "aircrafts"[All Fields] OR "airplane"[All Fields] OR "airplanes"[All Fields] OR "aircraft s"[All Fields] OR ("aircraft"[MeSH Terms] OR "aircraft"[All Fields] OR "aeroplane"[All Fields] OR "aeroplanes"[All Fields] OR "aircrafts"[All Fields] OR "airplane"[All Fields] OR "airplanes"[All Fields] OR "aircraft s"[All Fields]) OR ("flight"[All Fields] OR "flighted"[All Fields] OR "flights"[All Fields])) AND ("aircrew"[All Fields] OR "aircrews"[All Fields] OR "crew member"[All Fields] OR "flight crew"[All Fields] OR ("pilot s"[All Fields] OR "piloted"[All Fields] OR "piloting"[All Fields] OR "pilots"[MeSH Terms] OR "pilots"[All Fields] OR "pilot"[All Fields]) OR "flight attendant"[All Fields] OR ("passenger"[All Fields] OR "passenger s"[All Fields] OR "passengers"[All Fields]) OR ("travel"[MeSH Terms] OR "travel"[All Fields] OR "traveling"[All Fields] OR "travelling"[All Fields] OR "travels"[All Fields] OR "traveled"[All Fields] OR "traveler"[All Fields] OR "traveler s"[All Fields] OR "travelers"[All Fields] OR "travelled"[All Fields] OR</p>	435	31/12/2022

		"traveller"[All Fields] OR "travellers"[All Fields] OR "travellers"[All Fields]) OR "frequent flyer"[All Fields] AND (cardiovascular) NOT "space flight"[MeSH Terms]		
Cancer	PubMed®	((("cockpit"[All Fields] OR "airliner"[All Fields] OR ("aircraft"[MeSH Terms] OR "aircraft"[All Fields] OR "aeroplane"[All Fields] OR "aeroplanes"[All Fields] OR "aircrafts"[All Fields] OR "airplane"[All Fields] OR "airplanes"[All Fields] OR "aircraft s"[All Fields] OR ("aircraft"[MeSH Terms] OR "aircraft"[All Fields] OR "aeroplane"[All Fields] OR "aeroplanes"[All Fields] OR "aircrafts"[All Fields] OR "airplane"[All Fields] OR "airplanes"[All Fields] OR "aircraft s"[All Fields]) OR ("flight"[All Fields] OR "flighted"[All Fields] OR "flights"[All Fields])) AND ("aircrew"[All Fields] OR "aircrews"[All Fields] OR "crew member"[All Fields] OR "flight crew"[All Fields] OR ("pilot s"[All Fields] OR "piloted"[All Fields] OR "piloting"[All Fields] OR "pilots"[MeSH Terms] OR "pilots"[All Fields] OR "pilot"[All Fields]) OR "flight attendant"[All Fields] OR ("passenger"[All Fields] OR "passenger s"[All Fields] OR "passengers"[All Fields]) OR ("travel"[MeSH Terms] OR "travel"[All Fields] OR "traveling"[All Fields] OR "travelling"[All Fields] OR "travels"[All Fields] OR "traveled"[All Fields] OR "traveler"[All Fields] OR "travelers"[All Fields] OR "travelled"[All Fields] OR "traveller"[All Fields] OR "travellers"[All Fields] OR "travellers"[All Fields]) OR "frequent flyer"[All Fields]) AND (cancer) NOT "space flight"[MeSH Terms]	355	31/12/2022
Syndrome aérotoxique	Scopus®	Aerotoxic syndrome	31/12/2022	46
Syndrome aérotoxique	PubMed®	Aerotoxic syndrome	31/12/2022	30

Syndrome aérottoxique	Google Scholar	Aerotoxic syndrome	31/12/2022	415
----------------------------------	---------------------------	--------------------	------------	-----

Les requêtes suivantes ont été élaborées en parallèle dans les deux moteurs de recherche Scopus et Pubmed et ont été retenues après 13 tests discutés avec les collectifs d'experts

Requête Pubmed (date de la dernière recherche : 18/10/2021)

(aircraft OR flight OR airplane OR airliner OR cockpit) NOT ("space flight" OR "space travel" OR spacecraft OR "space station" OR spaceflight OR helicopter) AND (passenger OR traveler OR "crew member*" OR aircrew OR "flight crew*" OR pilot OR "flight attendant" OR aviator) AND (health OR outcomes OR disease OR mortality OR morbidity OR epidemiolog* OR associat* OR toxicolog* OR "risk assessment") AND (Cohort[Title] OR case-control[Title] OR case-study[Title] OR longitudinal[Title])

➔ Cette requête a identifié 63 références (sans doublon).

Requête Scopus (date de la dernière recherche : 18/10/2021)

TITLE-ABS-KEY ((aircraft OR flight OR airplane OR airliner OR cockpit) AND (health OR outcomes OR disease OR mortality OR morbidity OR epidemiolog* OR associat* OR toxicolog* OR "risk assessment") AND (passenger OR traveler OR "crew member*" OR aircrew OR "flight crew*" OR pilot OR "flight attendant") AND NOT ("space flight" OR "space travel" OR spacecraft OR "space station" OR spaceflight OR helicopter)) AND TITLE (cohort OR case-control OR case-study OR longitudinal)

➔ Cette requête a identifié 127 références (sans doublon).

Après mise en commun des résultats issus des recherches Pubmed et Scopus, 321 références (sans doublon) ont été identifiées.

Le tri sur titre et abstract des références obtenues à partir des requêtes a été réalisée sur un fichier Excel selon trois modalités de décision : « inclus », « exclus » et « peut-être ». La sélection a été faite en simple lecture par un agent de l'Anses.

Annexe 12. Tableaux de synthèse des données épidémiologiques

Tableau 40 : Synthèse des données épidémiologiques sur les cancers cutanés

Article / revue	Population	Résultats (nombre d'études)	Risque attribuable (fraction préventive)	Remarques Complémentaires
Ballard <i>et al.</i> 2000 Revue	PNT homme	Mortalité (2) RRc : 2,96 (95 % IC : 1,53-5,73)* RRc-sse : 1,97 (95 % IC : 1,02-3,82)	0,49	
		Incidence (2) RRc : 1,61 (95 % IC : 0,82-3,15) RRc-sse : 1,07 (95 % IC : 0,55-2,10)	0,07	
	PNC femme	Incidence (2) RRc : 2,31 (95 % IC : 1,24-4,3)* RRc-sse : 1,54 (95 % IC : 0,83-2,87)	0,35	
Cashman <i>et al.</i> (2007) Article	72 972 Pilotes hommes Age moyen : 43,09±9,09 3 682 pilotes femmes Age moyen : 38,95 ±7,96	SMR = 0,53 (95 % IC : 0,24-1,00)		
Fink et Bates (2005) Revue	PNC / PNT	Incidence (10) SIR : 2,27 (1,96 – 2,64)		Hétérogénéité p : 0,94
Gudmundsdottir, Hrafnkelsson et Rafnsson 2017 (article)	551 Pilotes islandais masculins : - 286 de la compagnie Icelandair - 265 autres pilotes	SIR <u>mélanomes</u> : 3,31 (CI : 1,33-6,81)* <u>Baso-cellulaire</u> : 2,49 (CI : 1,69-3,54)* <u>Cabines</u> : 2,09 (CI : 1,67-2,62)*		
Haldorsen, Reitan et Tveten 2000 Article	Cohorte de pilotes inscrits à l'administration de l'aviation civile norvégienne et ayant volé entre 1946 et 1994.	Incidence mélanome : SIR : 1,8 (95% IC : 1,1-1,7)* Incidence autres cancers cutanés : SIR : 2,4 (95% IC : 1,3-4,0)*		Pour le mélanome malin, tendance à la hausse du SIR par dose, mais moins apparente pour les heures bloquées.

Article / revue	Population	Résultats (nombre d'études)	Risque attribuable (fraction préventive)	Remarques Complémentaires
McNeely <i>et al.</i> 2018 Article	5366 PNC vs 2729 témoins de même CSP	SPR mélanomes femmes : 2,27 (IC à 95 % : 1,27-4,06)* SPR non- mélanomes femmes 4,09 (IC à 95 % : 2,70-6,20)* SPR mélanomes hommes : 1,47 (IC à 95 % : 0,72-3,01) SPR non- mélanomes hommes : 1,11 (IC à 95 % : 0,78-1,59)		Forte augmentation de SPR chez les hommes exposés aux fumées secondaires de tabac SPR : 3,80 (IC : 1,67-8,65) mélanomes SPR : 2,43 (IC : 1,53-3,87) hors mélanomes SPR similaires si restriction aux participants blancs non hispaniques (données non présentées).
Miura <i>et al.</i> 2019 Revue	7 études incidence mélanomes chez pilotes de lignes 3 études mortalité mélanomes chez pilotes 2 études incidence mélanomes PNC 1 étude mortalité mélanome PNC 1 étude incidence épidermoïde pilotes 1 étude mortalité épidermoïde pilotes 1 étude incidence épidermoïde PNC 1 étude mortalité épidermoïde PNC masculins (8 décès !)	pSIR mélanomes 2,03 (IC : 1,71-2,40)* pSMR mélanomes 1,99 (IC : 1,17-3,40)* pSIR mélanomes 2,12 (IC : 1,71-2,62)* pSMR mélanomes 1,18 (IC : 0,73-1,89) pSIR épidermoïdes 2,46 (IC : 1,88-3,16)* pSMR épidermoïdes 0,93 (IC : 0,15-3,04) pSIR épidermoïdes 1,97 (IC : 1,25-2,96)* pSMR épidermoïdes 8,01 (IC : 2,98-17,33)	Relation avec : - durée d'emploi, - exposition au rayonnement cosmique - longueur des vols internationaux Pas de relation dose- réponse Pas de relation dose- réponse Pas de relation dose- réponse	Hétérogénéité : $I^2 = 0.0\%$, $P = 0.84$ Hétérogénéité : $I^2 = 41.6\%$, $P = 0.18$ Hétérogénéité : $I^2 = 0.0\%$, $P = 0.55$ Hétérogénéité : $I^2 = 1.4\%$, $P = 0.39$
Nicholas, Swearingen et Kilmer 2009 Article	2428 pilotes masculins et non hispaniques de 4 compagnies américaines (ALPA).	OR chez pilotes ayant moins de 20 ans d'ancienneté Utilisation d'écran solaire : 0,6 (0,4-0,8) Type de peau : 3,2 (2,0- 5,2)*		Faible taux de réponse (19%) limitant la généralisation des résultats

Article / revue	Population	Résultats (nombre d'études)	Risque attribuable (fraction préventive)	Remarques Complémentaires
		<p>Coups de soleil dans l'enfance : 2,1 (1,5-3,0)*</p> <p>ATCD familiaux mélanomes : 0,2 (0,1-0,3)</p> <p>ATCD familiaux autres cancers cutanés : 8,6 (5,8-12,7)*</p> <p>OR chez pilotes ayant plus de 20 ans d'ancienneté</p> <p>Coups de soleil dans l'enfance : 1,6 (1,2-2,2)*</p> <p>Temps passés en vol de haute latitude : 1,4 (1,0-1,9)*</p> <p>ATCD familiaux autres cancers cutanés : 4,1 (3,0-5,7)*</p>		
Olsen <i>et al.</i> 2019 Article	Pilotes de lignes masculins australiens 91370 pilotes-années	<p>SIR mélanomes invasifs 1,20 (IC 95% : 0,89-1,55)</p> <p>SIR mélanomes in situ 1,39 (IC 95% : 1,08-1,78)*</p>		
Sanlorenzo <i>et al.</i> 2015 Revue	266 431 participants au total (PNC et PNT)	<p>SIR</p> <p><u>Global</u> : 2,21 (CI : 1,76-2,77)</p> <p><u>Pilotes</u> : 2,22 (CI : 1,67-2,93)</p> <p><u>Cabines</u> : 2,09 (CI : 1,67-2,62)</p> <p>SMR</p> <p><u>Global</u> : 1,42 (CI : 0,89-2,26)</p> <p><u>Pilotes</u> : 1,83 (CI : 1,27-2,63)</p> <p><u>Cabine</u> : 0,90 (CI : 0,80-1,01)</p>	<p>P<0,01</p> <p>P<0,01</p> <p>P = 0,45</p> <p>P=0,02</p> <p>P = 0,33</p> <p>P=0,02</p>	<p>Par sexe :</p> <p><u>SIR global femmes</u> : 1,93 (CI : 1,50-2,48) P= 0,41</p> <p><u>SIR global Hommes</u> : 2,38 (CI : 1,75-3,23) P=0,01</p> <p><u>SMR global femmes</u> : 0,61 (CI : 0,13-2,85) P=0,51</p> <p><u>SMR global hommes</u> : 1,87 (CI : 1,32-2,65) P=0,39)</p>
Tokumaru <i>et al.</i> 2006 Revue	PNC femme	<p>Incidence (5) RRc : 2,13 (95 % IC : 1,58-2,88)*</p>	0,53	

Tableau 41 : Synthèse des données épidémiologiques sur les maladies cardiovasculaires

Référence	Type d'étude	Objectifs	Phénotype	Résultats
Adi et al. The association between air travel and deep vein thrombosis: systematic review & meta-analysis. BMC Cardiovasc Disord. 2004 May 19;4:7. doi: 10.1186/1471-2261-4-7.	Revue systématique	Estimation de l'incidence et du risque encouru par les voyageurs en avion comparativement à une population témoin	Thrombose veineuse profonde	Études retenues : 6 études descriptives : 0-0,28% des thromboses symptomatiques et 0-10,34% des thromboses asymptomatiques 4 études étiologiques : 1,70 (95% CI: 0,89–3,22).
(Aragón-Vela et al. 2020) Aragon-Vela et al. Does intermittent exposure to high altitude increase the risk of cardiovascular disease in workers? A systematic narrative review. BMJ Open. 2020 Nov 20;10(11):e041532. doi: 10.1136/bmjopen-2020-041532.	Revue systématique	Étude de l'effet de l'exposition hypoxique intermittente	Mortalité cardiovasculaire	Études sélectionnées : 17 rétrospectives 14 observationnelles Le personnel navigant est exposé à des hypoxies intermittentes de courte durée La mortalité cardiovasculaire est plus faible que la moyenne en population générale
(Cashman et al. 2007) Cashman et al. Mortality among airline pilots in the United States. International Journal of Applied Aviation Studies 7(2):202-210.	Rétrospective	Comparaison des taux de mortalité des pilotes américains de la Air Line Pilots Association (ALPA) à la population générale.	Taux de mortalité standardisé (SMR)	SMR : Maladie cérébrovasculaire = 0,06 (95% CI 0,02-0,15) Maladie des artères, artérioles et capillaires = 1,61 (95% CI 0,74-3,05) Infarctus du myocarde = 0,10 (95% CI 0,06-0,15) Cardiopathie ischémique chronique = 0,12 (95% CI 0,08-0,18)
(Goffeng et al. 2019) Goffeng et al. Cardiac autonomic activity in commercial aircrew during an actual flight duty period. Aerosp Med Hum Perform. 2019 Nov 1;90(11):945-952. doi: 10.3357/AMHP.5389.2019.	Transversale	Évaluation des changements de variabilité de la fréquence cardiaque pendant le travail et le sommeil, et en fonction des	Activité cardiaque	Augmentation de la tension cardiaque chez les 49 personnels navigants suivis sur 4 jours pendant les périodes de travail (39h consécutives)

Référence	Type d'étude	Objectifs	Phénotype	Résultats
		caractéristiques du travail		
(Jacobson <i>et al.</i> 2002) Jacobson et al. Risk factors for deep vein thrombosis in short-haul cockpit crews: A prospective study. <i>Aviat Space Environ Med.</i> 2002 May;73(5):481-4.	Transversale	Collecte de données lors de vols nationaux court-courrier (3-10h)	Thrombose veineuse profonde	Pas d'évènement thrombotique observé au cours de l'étude
Kuipers et al. Travel and venous thrombosis: a systematic review. <i>J Intern Med.</i> 2007 Dec;262(6):615-34. doi: 10.1111/j.1365-2796.2007.01867.x.	Revue systématique	Quantification du risque de thrombose veineuse lors de voyages longue distance	Thrombose veineuse	Études retenues : 10 cas-témoins 20 prospectives 11 interventionnelles 14 physiopathologiques Pas suffisamment de preuve pour associer le risque de thrombose veineuse aux voyages en avion Association aux voyages longues distance
Kuipers et al. The incidence of venous thromboembolism in commercial airline pilots: A cohort study of 2630 pilots. <i>J Thromb Haemost.</i> 2014 Aug;12(8):1260-5. doi: 10.1111/jth.12627. Epub 2014 Jun 27.	Étude de cohorte	Étude de l'incidence des thromboses veineuses symptomatiques chez les pilotes de vols commerciaux en comparaison à la population générale	Thrombose veineuse	Pas d'augmentation de l'incidence chez les 2630 pilotes suivis (20420 personnes-années)
Mc Neely et al. The self-reported health of U.S. flight attendants compared to the general population. <i>Environ Health.</i> 2014 Mar 10;13(1):13. doi: 10.1186/1476-069X-13-13.	Transversale	Étude des effets des expositions professionnelles sur la santé des hôtesses de l'air et stewards en comparaison à la population générale (National Health and Nutrition Survey)	Santé globale	Prévalence des maladies cardiaques chez les hôtesses de l'air 3,5 fois plus élevée (95% CI 2,72 – 4,30)
Mc Neely et al. Legacy health effects among never smokers exposed to occupational secondhand smoke. <i>PLoS One.</i> 2019 Apr	Rétrospective	Évaluation des effets de l'exposition professionnelle au tabagisme passif	Santé globale	Augmentation du risque d'infarctus du myocarde

Référence	Type d'étude	Objectifs	Phénotype	Résultats
18;14(4):e0215445. doi: 10.1371/journal.pone.0215445.		chez les travailleurs qui n'ont jamais fumé.		(OR = 140, 95% IC 1,04-3-27), de maladies artérielles périphériques (OR = 1,27, 95% IC 1,00-1,97)
(Stavola <i>et al.</i> 2012) Stavola <i>et al.</i> Cause-specific mortality in professional flight crew and air traffic control officers: findings from two UK population-based cohorts of over 20,000 subjects. <i>Int Arch Occup Environ Health.</i> 2012 Apr;85(3):283-93. doi: 10.1007/s00420-011-0660-5.	Prospective	Comparaison des taux de mortalité des équipages britanniques à ceux des contrôleurs aériens et de la population générale	Taux de mortalité standardisé (SMR) Hazard ratio (HR) de mortalité	SMR (cardiovasculaire vs contrôleurs aériens) = 0.77 (95% CI 0.49, 1.20) SMR (cardiovasculaire vs population générale) = 0.19 (95% CI 0.16-0.23) HR (cardiovasculaire vs contrôleurs aériens) = 0.98 (95% CI 0.61-1.56)
Sykes <i>et al.</i> A study of airline pilot morbidity. <i>Aviat Space Environ Med.</i> 2012 Oct;83(10):1001-5. doi: 10.3357/asem.3380.2012.	Exposé-non exposé transversal	Étude de la santé des pilotes en comparaison avec la population générale (New Zealand Health Survey)	Santé globale (questionnaire), IMC, pression artérielle, profil lipidique, glucose sanguin	Meilleure santé cardiovasculaire

Tableau 42 : Synthèse des données épidémiologiques sur les effets sur la reproduction féminine

Référence (auteur, année)	Type de revue	Critères d'inclusion	Conclusion auteurs	Population	Résultats - Limites
Grajewski, 2015	Etude de cas (questionnaire envoyé à des femmes personnels de vol) vs témoin (institutrices).	PNC 18-45 ans relation conjugale pendant la période d'étude (pour augmenter la probabilité de grossesse) ; et non stérilisée chirurgicalement avant la période d'étude,	PNC ne sont pas plus susceptibles de faire une fausse couche que le groupe témoin (enseignantes).	PNC et Enseignantes	non significatif, effectif satisfaisant
Heidecker 2017	étude transversale rétrospective, questionnaire	145 PNC volant avant l'interdiction de la cigarette dans les avions	les fausses couches sont plus nombreuses chez le personnel de vol, pas de lien avec l'expo à la fumée de cigarette	PNC	p<0.002, Faible effectif
Radowicka 2021b	étude transversale	103 femmes 23-46 ans, polonaise (60 contrôles, 43 exposés	L'hyperprolactinémie est plus fréquente chez les agents de bord féminins que dans la population générale. Les valeurs élevées de la concentration de prolactine chez les hôtesses de l'air se manifestent rarement par des symptômes cliniques. La fréquence des vols et la durée du service n'affectent pas le développement de l'hyperprolactinémie ni la concentration moyenne de prolactine.	PNC	hyperprolactinémie significative P < 0.001
Radowicka 2013	questionnaire	43 PNC	La spécificité du travail des hôtesses de l'air contribue à une incidence plus élevée de troubles menstruels, de troubles du sommeil et d'érosions cervicales. Ces troubles semblent être largement liés au travail posté.		Non significatif -Faible effectif

Référence (auteur, année)	Type de revue	Critères d'inclusion	Conclusion auteurs	Population	Résultats - Limites
Magann <i>et al.</i> , 2010	Revue narrative	Etudes documentant des effets sur la santé des passagers aux aviateurs militaires	Avortement spontané	PNC femme	odds ratio [OR] : 1,62, intervalle de confiance à 95 % [IC] : 1,29, 2,04)
			Naissances avant terme < 37 semaines	Passagers	odds ratio [OR] : 1,44, IC à 95 % : 1,07, 1,93
Copeland 2011, citant Vaughan 1984	Revue narrative	Etudes documentant des effets sur la santé liés à l'exposition aux rayonnements des personnels navigants	Mortalité intra-utérine	PNC	significative

Tableau 43 : Synthèse des données épidémiologiques sur les troubles psychosociaux

Référence (auteur, année)	Type de revue	Critères d'inclusion	Conclusion auteurs	Population	Résultat
Jackson & Earl 2006	Etude transversale	Pilotes court courriers compagnies low costs ou régulières	Pilotes dans compagnies bas prix plus fatigués que compagnies classiques, mais un facteur confondant (pratique du vol en loisirs pas pris en compte)	162 pilotes court-courrier	non significatif
Lee <i>et al.</i> 2008	Etude transversale	Hôtesse de l'air ayant effectué au moins un vol long-courrier (>6 heures), au moins un vol international long-courrier (>6 heures) au cours des 3 mois précédents ayant travaillé au moins 75 heures au cours du mois précédent.	Insécurité professionnelle augmente les TMS. Personnes souffrant de TMS perçoivent plus les exigences psychologiques de leur travail.	PNC	significatif
Prombumroong <i>et al.</i> 2011	Etude transversale	Pilotes d'une compagnie aérienne thaïlandaise sans antécédents de chirurgie du rachis	Risque de lombalgies associés i) à la fréquence des turbulences subies ii) bruit dans cockpit iii) manipulation de bagages 4 fois ou plus pdt service	684 pilotes	significatif

Référence (auteur, année)	Type de revue	Critères d'inclusion	Conclusion auteurs	Population	Résultat
		lombaire, de traumatismes ou d'accidents dans la région lombaire ou diagnostic d'anomalie congénitale de la colonne vertébrale, d'arthrite rhumatoïde, d'infection ou d'autres maladies. congénitale de la colonne vertébrale, d'arthrite rhumatoïde, d'infection de la colonne vertébrale et des disques, spondylarthrite ankylosante, spondylolisthésis lombaire, spondylose lombaire, tumeur, lupus érythémateux disséminé ou ostéoporose.	Exercice physique diminue lombalgies	684 pilotes Thaï	significatif
Runeson-Broberg et al. 2014	Etude transversale	Pilotes de compagnies aériennes suédoises ayant répondu au questionnaire	TMS affectés par risques psychosociaux (exigences élevées, faible soutien social)	354 pilotes suédois	significatifs
Pasha et Stokes 2018	Revue systématique	Etudes originales en langue anglaise sur la santé mentale des pilotes de l'aviation commerciale - prévalence des troubles mentaux, suicide et toxicomanie	Prévalence de 1.9 à 12.6%	Pilotes de ligne	Prévalence de 1.9 à 12.6%

Tableau 44 : Synthèse des données épidémiologiques sur les TMS

Référence	Type d'étude	Population	Année de l'étude	Objectifs
P.H. Chen, Liu, <i>et al.</i> 2021	Etude transversale Questionnaire en ligne	88 Femmes PNC (Taiwan)	Novembre 2017 à juillet 2018	Evaluer la prévalence des TMS notamment en fonction de 6 tâches communes dans les cabines
Runeson-Broberg, Lindgren et Norbäck (2014)	Etude transversale Questionnaire auto-administré. Pour les TMS, rapport des symptômes sur les 3 derniers mois	354 Pilotes (compagnie aérienne suédoise) 354 participants	2010	Evaluer la prévalence des TMS et étudier les associations entre les TMS, la durée de vol et les conditions psychologiques au travail
Mc Neely (2014)	Etude par auto-questionnaire des PN de deux compagnies aériennes US Comparaison avec la cohorte NHANES, avec un ajustement sur l'âge et le sexe	4 011 PNC (80 % de femmes) Age moyen : 47 ans	2007	Comparer la santé des PN avec celle de la population générale Exploration d'une association entre la prévalence des pathologies principales et la durée de l'exposition (proxy : durée d'emploi)
Prombumroong <i>et al.</i> , 2011	Etude transversale auto-questionnaire	PNT : 684 d'une compagnie thaïlandaise Age moyen : 40,3 ans (SD : 9,6) Critères d'exclusions : historique médical de pathologies dorsales, immunologiques, tumeur...	Juillet à octobre 2010	Examiner la prévalence des douleurs lombaires (LBP) dans les 12 mois précédents et identifier les facteurs associés (individuels, liés aux vols et psychologiques)
Lee <i>et al.</i> 2007	Etude transversale	164 PNC femmes (Etats-Unis) ayant effectué au moins un vol long courrier international (>6 h) durant les 3 derniers mois et ayant travaillé au moins 75 sur le dernier mois	2004	Etudier les relations entre le stress psychosocial lié à l'emploi et les TMS de la région lombaire
Lee <i>et al.</i> 2006	Etude transversale Auto-questionnaire	185 PNC femmes (Etats-Unis) ayant effectué au moins un vol long	Janvier à avril 2005	Identifier les TMS en lien avec le travail (lieux, fréquence, durée et

Référence	Type d'étude	Population	Année de l'étude	Objectifs
		courrier international (>6 h) durant les 3 derniers mois et ayant travaillé au moins 75 sur le dernier mois		intensité) durant les 12 derniers mois
Ihlebaek <i>et al.</i> 2022	Etude transversale	Personnels navigants (Norvège) 107 hommes 320 femmes	2013	Investiguer les différences de genres pour les TMS et le stress psychosocial lié à l'emploi

Annexe 13. Biomarqueurs de lésion neuronale ou cérébrale

La figure schématique suivante montre l'origine cellulaire possible des biomarqueurs associés au traumatisme crânien

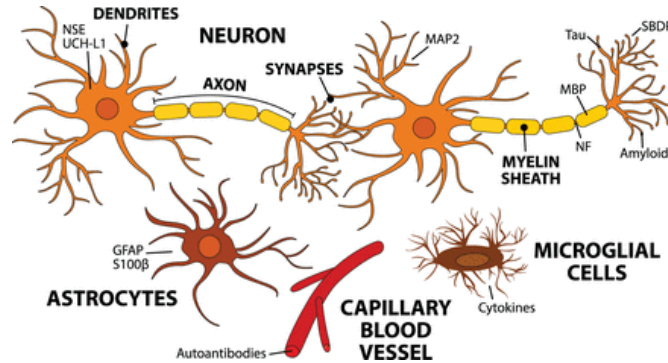


Figure 18 : Origine cellulaire de biomarqueurs associés au traumatisme crânien (source : In : Harel Adrian, Kvist Mårten, Nuutinen Salla, and Välimaa Lasse. Biomarkers of Traumatic Brain Injury: Temporal Changes in Body Fluids.)

La figure suivante représente la différenciation neuronale et les biomarqueurs potentiels spécifiques des neurones, lors de neurodégénérescence ou de survenue de lésions neuronales

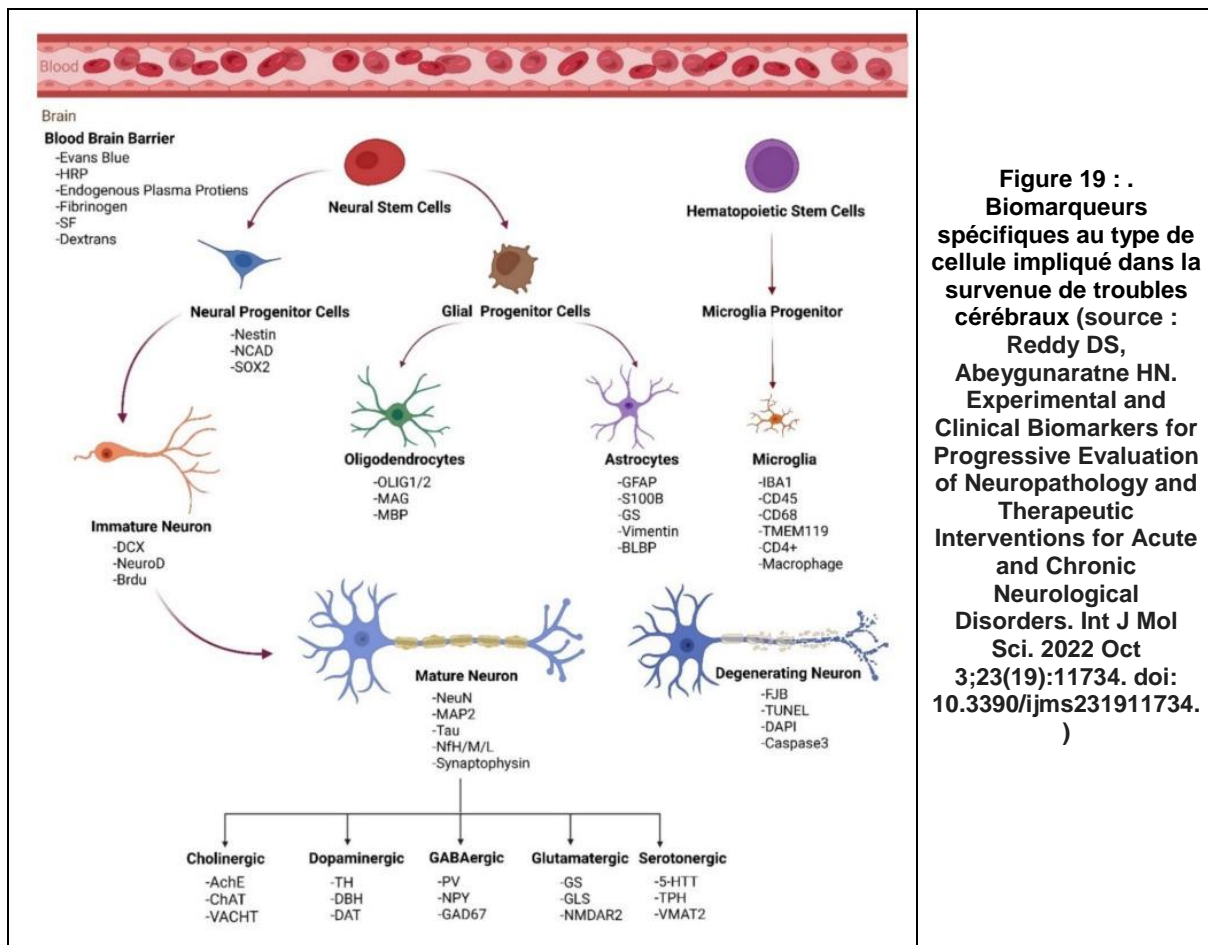


Figure 19 : Biomarqueurs spécifiques au type de cellule impliqué dans la survenue de troubles cérébraux (source : Reddy DS, Abeygunaratne HN. Experimental and Clinical Biomarkers for Progressive Evaluation of Neuropathology and Therapeutic Interventions for Acute and Chronic Neurological Disorders. Int J Mol Sci. 2022 Oct 3;23(19):11734. doi: 10.3390/ijms231911734.)

La figure suivante illustre la genèse des anticorps potentiels biomarqueurs, car lors d'un neurotraumatisme du SNC, plusieurs événements pathologiques sont activés, brèche dans la Barrière Hémato-Encéphalique couplée à l'activation de voies délétères (excitotoxicité, nécrose, apoptose, activation de la protéase) conduisent à une lésion des cellules neurales. Les composants moléculaires (ADN, lipides, protéines, récepteurs) de ces structures neurales sont libérés dans la circulation où ils rencontrent notre réponse immunitaire adaptative (lymphocytes B et T) qui peut les reconnaître comme des antigènes non-soi et déclencher une réponse auto-immune. L'existence durable de ces auto-anticorps peut représenter une excellente cible en tant que nouveaux biomarqueurs indiquant la gravité des blessures.

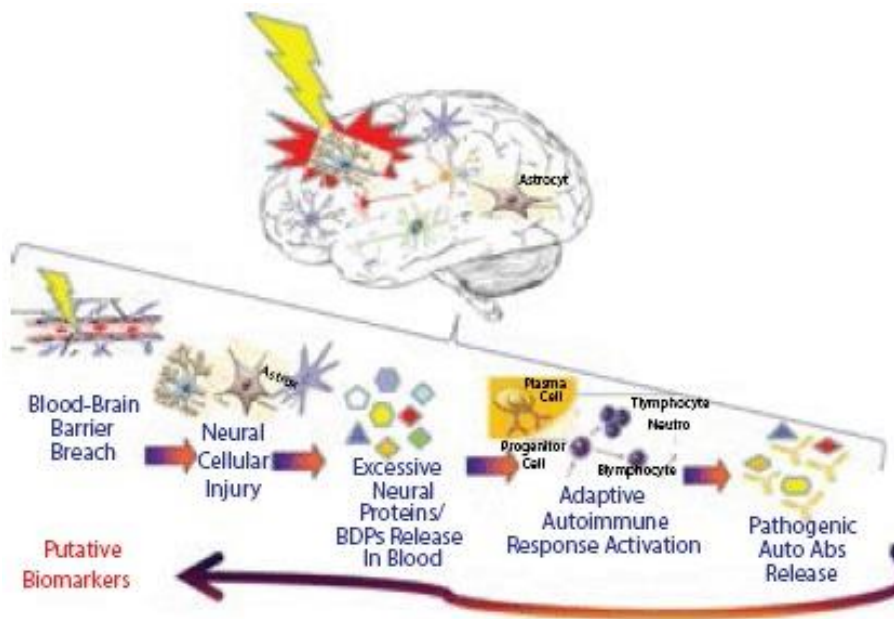


Figure 20 : Genèse des auto-anticorps en tant que biomarqueurs potentiels. (Source : Kobeissy F, Moshourab RA. Autoantibodies in CNS Trauma and Neuropsychiatric Disorders: A New Generation of Biomarkers. In: Kobeissy FH, editor. Brain Neurotrauma: Molecular, Neuropsychological, and Rehabilitation Aspects. Boca Raton (FL): CRC Press/Taylor & Francis; 2015. Chapter 29.

Annexe 14. Requêtes bibliographiques relatives à la partie pollution de l'air des cabines

thématique	base	requête	date	résultats
polluants / concentration / sources	pubmed	((aircraft[Title/Abstract] OR airplane[Title/Abstract] OR airliner[Title/Abstract]) AND (cabin[Title/Abstract] OR cockpit[Title/Abstract] OR indoor[Title/Abstract])) AND (contaminant[Title/Abstract] OR pollutant[Title/Abstract] OR particulate[Title/Abstract] OR particle[Title/Abstract] OR "nanoparticle"[Title/Abstract] OR "UFP"[Title/Abstract] OR "PM10"[Title/Abstract] OR "PM2,5"[Title/Abstract] OR "PM0,1"[Title/Abstract] OR "PM1"[Title/Abstract] OR chemical[Title/Abstract] OR compound[Title/Abstract] OR dust[Title/Abstract] OR fume[Title/Abstract] OR ozone[Title/Abstract] OR aldehyde[Title/Abstract] OR formaldehyde[Title/Abstract] OR acetaldehyde[Title/Abstract] OR carbonyl[Title/Abstract] OR acrolein[Title/Abstract] OR ketone[Title/Abstract] OR inorganic[Title/Abstract] OR aromatic[Title/Abstract] OR organic[Title/Abstract] OR phosphate[Title/Abstract] OR trimethylphosphate[Title/Abstract] OR "TCP"[Title/Abstract] OR tributylphosphate[Title/Abstract] OR "TBP"[Title/Abstract] OR pesticide[Title/Abstract] OR pyrethroid[Title/Abstract] OR lubricant[Title/Abstract] OR oil[Title/Abstract] OR "Flame retardant"[Title/Abstract] OR "BFR"[Title/Abstract] OR chlor*[Title/Abstract] OR *brom*[Title/Abstract] OR ether[Title/Abstract] OR "PBDE"[Title/Abstract] OR "polybrominated diphenyl ether"[Title/Abstract] OR "nitric oxide"[Title/Abstract] OR "nitrogen dioxide"[Title/Abstract] OR "NOx"[Title/Abstract] OR carbon[Title/Abstract] OR "CO"[Title/Abstract] OR "CO2"[Title/Abstract] OR benzene[Title/Abstract] OR toluene[Title/Abstract] OR VOC[Title/Abstract] OR "TVOC"[Title/Abstract] OR "SVOC"[Title/Abstract] OR "VOC"[Title/Abstract] OR "carboxylic acid"[Title/Abstract] OR alcohol[Title/Abstract] OR "ethylene glycol"[Title/Abstract] OR "ethanediol"[Title/Abstract] OR "propylene glycol"[Title/Abstract] OR "propanediol"[Title/Abstract]) AND(Measurement[Title/Abstract] OR monitoring[Title/Abstract] OR sampling[Title/Abstract] OR concentration[Title/Abstract] OR exposure[Title/Abstract] OR source[Title/Abstract] OR emission[Title/Abstract])	04/01/2022	120
	scopus	(TITLE-ABS (aircraft OR airplane OR airliner) AND TITLE-ABS (cabin OR cockpit OR indoor)) AND (TITLE-ABS (contaminant OR pollutant OR particulate OR *particle OR "nanoparticle" OR "UFP" OR "PM10" OR "PM2,5" OR "PM0,1" OR "PM1" OR chemical OR compound OR dust OR fume OR ozone OR *aldehyde OR formaldehyde OR acetaldehyde OR carbonyl OR acrolein OR ketone OR inorganic OR aromatic OR organic OR *phosphate OR trimethylphosphate OR "TCP" OR tributylphosphate OR "TBP" OR pesticide OR pyrethroid OR lubricant OR oil OR "Flame retardant" OR "BFR" OR chlor* OR *brom* OR ether OR "PBDE" OR "polybrominated diphenyl ether" OR "nitric oxide" OR "nitrogen dioxide" OR "NOx" OR carbon OR "CO" OR "CO2" OR benzene OR toluene OR *voc OR "TVOC" OR "SVOC" OR "VOC" OR "carboxylic acid" OR alcohol OR "ethylene glycol" OR "ethanediol" OR "propylene glycol" OR "propanediol")) AND TITLE-ABS (measurement OR monitoring OR sampling OR concentration OR exposure OR source OR emission)	04/01/2022	624

odeur	pubmed	(aircraft[Title/Abstract] OR airplane[Title/Abstract] OR airliner[Title/Abstract]) AND (cabin[Title/Abstract] OR cockpit[Title/Abstract] OR indoor[Title/abstract]) AND (Odor[Title/Abstract] OR odour[Title/Abstract] OR Smell[Title/Abstract])	04/01/20 22	11
	scopus	(TITLE-ABS-KEY (aircraft OR airplane OR airliner) AND TITLE-ABS-KEY (cabin OR cockpit OR indoor)) AND (TITLE-ABS-KEY (odor OR odour OR smell))	04/01/20 22	55
Air quality	pubmed	((aircraft[Title/Abstract] OR airplane[Title/Abstract] OR airliner[Title/Abstract]) AND (cabin[Title/Abstract] OR cockpit[Title/Abstract] OR indoor[Title/Abstract])) AND (air[Title/Abstract] AND quality[Title/Abstract])	04/01/20 22	72
	scopus	(TITLE-ABS (aircraft OR airplane OR airliner) AND TITLE-ABS (cabin OR cockpit OR indoor) AND TITLE-ABS (air AND quality) AND TITLE-ABS (measurement OR monitoring OR sampling OR concentration OR exposure OR source OR emission))	04/01/20 22	198
bleed air	pubmed	((aircraft[Title/Abstract] OR airplane[Title/Abstract] OR airliner[Title/Abstract]) AND (cabin[Title/Abstract] OR cockpit[Title/Abstract] OR indoor[Title/Abstract])) AND ("bleed air"[Title/Abstract])	04/01/20 22	10
	scopus	(TITLE-ABS-KEY (aircraft OR airplane OR airliner) AND TITLE-ABS-KEY (cabin OR cockpit OR indoor) AND TITLE-ABS-KEY ("bleed air"))	04/01/20 22	108

Annexe 15. Revues de synthèse : pollution de l'air des cabines d'avions

R. Chen, Fang, et al. 2021

Contexte : La revue s'inscrit dans le cadre de deux projets visant à investiguer dans quelle mesure la ventilation en cabine et l'exposition aux polluants dans les avions commerciaux peuvent affecter les performances cognitives, le confort et la santé des passagers.

Objectif de l'étude : L'objectif est d'une part de documenter le nombre d'études ayant effectué des mesures sur l'environnement de la cabine des avions et le nombre de vols et types d'avions concernés, le type de paramètres environnementaux mesurés, la nature des contaminants les plus couramment mesurés et les concentrations associées, et d'autre part de réaliser une comparaison des concentrations de chaque contaminant avec les normes et recommandations lorsqu'elles existent.

Méthode : Pour réaliser leur revue de la littérature les auteurs ont consulté trois bases de données (période de recherche jusqu'à 2019) : Google Scholar, Web of science, Research Gate, en utilisant les mots clés suivants : aircraft cabin air quality, air pollutants, gaseous contaminants, VOCs, SVOCs, particles, micro-organisms

Critères d'inclusion – exclusion : Ont été inclus les documents faisant état de mesures effectuées dans des avions commerciaux dans des conditions normales de vol. N'ont pas été incluses les études faisant état de mesures dans une maquette simulée d'un avion, se concentrant sur les émissions des moteurs, faisant état d'expositions inhabituelles au cours desquelles les membres de l'équipage se sont plaints de la qualité de l'air de la cabine, ou visant à développer la surveillance de l'air et ses applications.

Résultats généraux: Les 47 publications retenues par les auteurs, rapportent des mesures de polluants chimiques en cabine d'avions, réalisées au cours de 2251 vols commerciaux (40 types d'avions différents), réalisées entre 1967 et 2019. Outre les composés organiques semi-volatils (COSV) (12 études – 540 vols), l'ozone (21 études – 1092 vols), les oxydes de carbones (CO, CO₂) ou d'azote (NO, NO₂, NO_x), les oxydes de soufre (SO_x), les micro-organismes (bactéries, moisissures) et, plus rarement, les matières particulaires (ou *particulate matter* en anglais (PM)), les composés chimiques mesurés dans les articles retenus par la revue sont essentiellement des composés organiques volatils (COV) (27 publications rapportant des mesures de COVs réalisées au cours de 1080 vols entre 1997 et 2019).

En termes d'exploitation des résultats de mesure de concentration, les auteurs ont effectué :

- une comparaison des niveaux de concentration mesurés aux seuils de détection olfactive (ODT) publiés pour les COV détectés, afin de déterminer quelle était leur probabilité de détection.
- une comparaison des concentrations mesurées aux lignes directrices proposées pour les cabines d'avions, ainsi qu'aux valeurs de référence existantes pour la qualité de l'air dans d'autres environnements ou l'air intérieur des bâtiments.
- Une discussion des résultats au regard des sources de contamination parfois citées dans les articles princeps.

Les concentrations rapportées ont été déterminées lors de vols au cours desquels aucun événement de contamination de la qualité de l'air des cabines (événement CAQ) n'a été rapporté. Les résultats concernant les micro-organismes, exclus du champ de l'expertise, ne sont pas rapportés dans le présent rapport.

Conclusion des auteurs : Les résultats et conclusions des auteurs sont rapportés dans les parties rapportant les concentrations mesurées par familles de polluants (Cf. §5.5.1).

Observations du GT :

Les points forts mis en avant par le GT sont notamment la rigueur méthodologique de la revue de la littérature, le fait qu'une analyse critique de la qualité des méthodes de mesures mises en œuvre dans les études incluses dans la revue ait été réalisée, le fait que les emplacements des mesures soient précisés, et la distinction des vols fumeurs et non-fumeurs.

Parmi les points faibles relevés par le GT, le fait que les mesures rapportées aient été effectuées lors de vols au cours desquels aucun événement CAQ n'est été rapporté dans les études princeps ne permet pas d'objectiver une source précise de contamination. Par ailleurs, parmi les études prises en compte, certaines ciblaient des composés spécifiques et d'autres visaient à identifier le plus grand nombre de COV présents dans l'air des cabines. Les objectifs étant différents, le panorama des polluants rapportés par R. Chen, Fang, *et al.* (2021) n'est pas exhaustif et les concentrations associées ne sont pas représentatives de la qualité de l'air à bord de tous les avions. Les pas de temps des mesures réalisées ne sont pas rapportés par R. Chen, Fang, *et al.* (2021).

Hayes et al. 2021

Contexte : A préciser

Objectif de l'étude : L'objectif est de synthétiser les données existantes pour évaluer les expositions du personnel navigant aux fumées, odeurs ou émanations dans les cabines d'avions au regard des contaminants suivants : fumée de tabac, matières particulaires, retardateurs de flamme, organophosphorés, composés organiques volatils (COV), autres agents chimiques et radiations afin de déterminer le risque professionnel qui peut être attribué à cette exposition, ainsi que les lacunes dans les connaissances sur les sources, les voies d'exposition et les récepteurs qui peuvent exister.

Méthode : Les auteurs ont effectué une revue systématique de la littérature en se basant sur les lignes directrices Prisma, en consultant trois bases de données (période de recherche jusqu'à janvier 2021) : Web of science, Science direct, Scopus, à l'aide de 5 requêtes :

- (“aerotoxic” AND aircraft) AND (organophosphate OR occupational OR exposure OR neurotoxic OR psychosomatic OR symptoms)).
- (“cabin air quality” AND aircraft) AND (fumes OR smoke OR oil OR mist OR particles OR sulfur OR metals OR flame retardant OR pesticide)).
- (“aircraft engine oil”) AND (tricresyl phosphate OR tcp OR tocp OR tmcp OR tpcp OR bleed air OR hydraulic OR potable OR pyrolyzed OR tnap)).
- (“flight crew” AND chemical exposure NOT “Space”) AND (inhalation OR absorption OR ingestion OR illness OR complaint OR death OR flight hours OR cohort)).
- (“sample collection” AND “aircraft cabin” NOT tobacco).

Critères d'inclusion : Les étapes d'identification, sélection et inclusion sont détaillées. Après identification, pour être sélectionnés les articles devaient être en anglais et le texte intégral disponible. Les doublons ont été supprimés. A la lecture du texte intégral, des articles ont été exclus sur la base de la qualité des sources et la pertinence des manuscrits.

Résultats : La revue a identifié 138 références publiées de 1990 à 2021 (1990–1999 (n = 8), 2000–2009 (n = 26), 2010–2019 (n = 88) et 2020–2021 (n = 17)). Les auteurs s'intéressent

aux mesures effectuées en cabine au cours de vols commerciaux (de 83 à 524 vols selon les articles pris en compte), aux études de biosurveillance, de cohortes, d'enquêtes et aux études expérimentales en laboratoire. Les auteurs rapportent notamment les résultats des concentrations mesurées, et discutent ces résultats au regard des sources de contamination parfois citées dans les articles. Les concentrations rapportées ont été déterminées lors de vols au cours desquels seuls ont été mentionnés (par Boer et al, 2015).

Conclusion des auteurs : Les résultats et conclusions des auteurs sont rapportés dans les parties rapportant les concentrations mesurées par familles de polluants (Cf. §XXX à XXX).

Observations du GT :

La rigueur méthodologique de la revue de la littérature est soulignée, et le fait que les auteurs discutent des limites de l'instrumentation mise en œuvre dans les études princeps est un point fort de la revue.

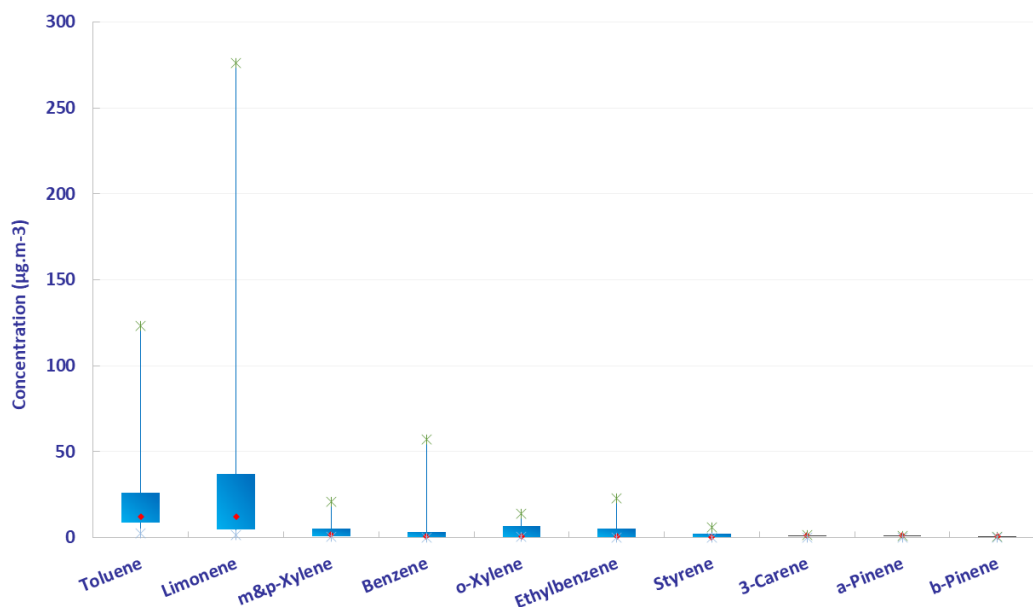
Les points faibles identifiés sont identiques à ceux déjà identifiés pour la revue de R. Chen, Fang, *et al.* (2021).

Annexe 16. Données détaillées COV (R. Chen, Fang, et al. 2021)

Composés aromatiques (dont les terpènes)

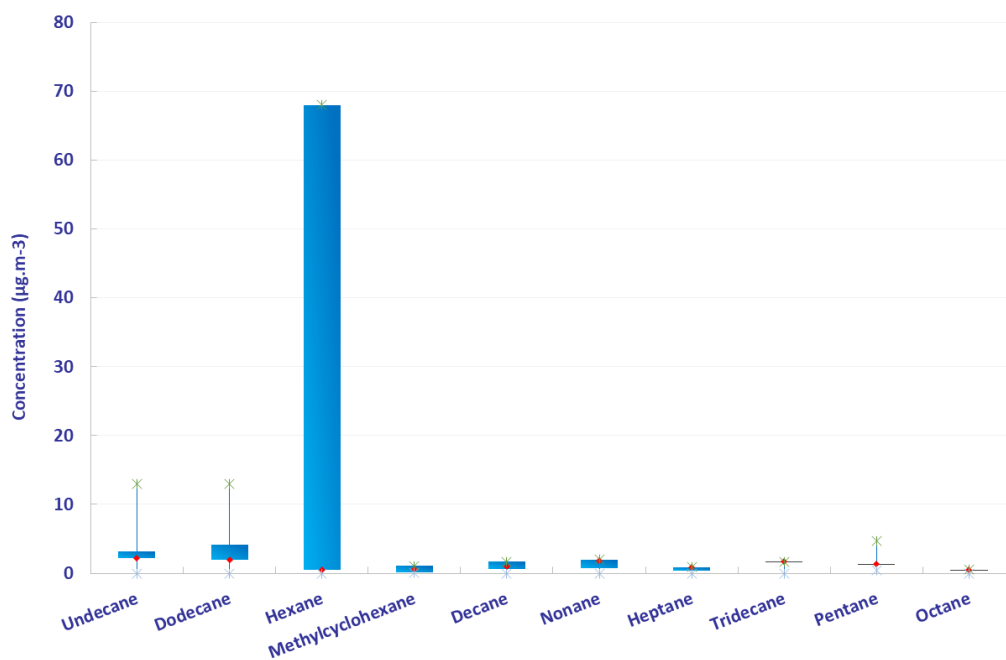
Composé	n° CAS	Concentration($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				Nombre	
		Moyenne	SD	Min.	Max.	Etudes	Vols
Toluene	108-88-3	15	12	0.0	209	7	402
Limonene	138-86-3	24	31	0.0	1048	6	339
m&p-Xylene	108-38-3/106-42-3	2.5	2.3	0.0	71	6	302
Benzene	71-43-2	5.9	5.5	0.0	78	6	238
o-Xylene	95-47-6	2.5	2.8	0.0	63	5	202
Ethylbenzene	100-41-4	2.3	2.9	0.0	45	5	202
Styrene	100-42-5	1.0	0.9	0.0	42	5	202
3-Carene	13466-78-9	1.1	0.5	0.0	42	2	74
b-Pinene	127-91-3	0.5	0.2	0.0	26	2	74
a-Pinene	80-56-8	1.1	0.3	0.0	12	2	74

Composés aromatiques - variation de la moyenne (Nétudes \geq 2), Chen et al. 2021



Alcanes

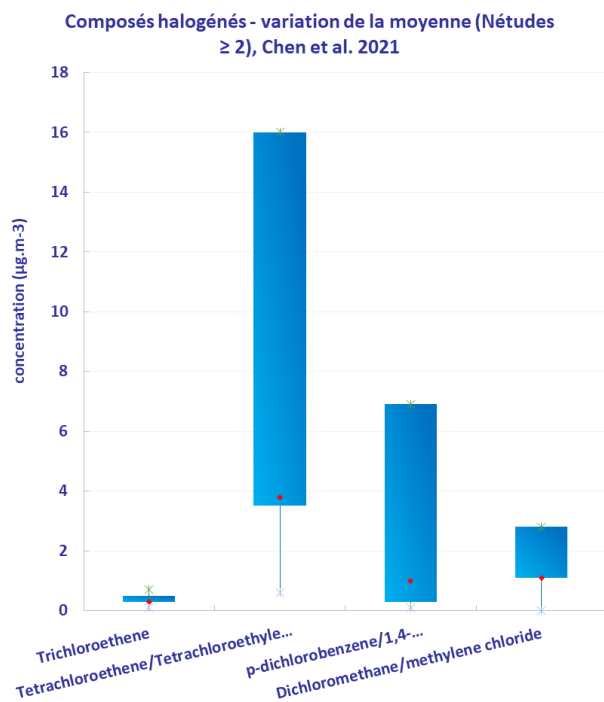
Composé	n° CAS	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				Nombre	
		Moyenne	SD	Min.	Max.	Etudes	Vols
Undecane	1120-21-4	2.9	1.6	0.0	87	5	239
Dodecane	93685-81-5	3.1	1.8	0.0	30	4	139
Hexane	110-54-3	20	31	0.0	1123	3	137
Methylcyclohexane	108-87-2	0.6	0.5	0.0	74	2	132
Decane	124-18-5	1.1	0.6	0.0	44	3	125
Heptane	142-82-5	>0.7	0.3	0.0	25	3	125
Nonane	111-84-2	>1.40	0.7	0.0	13	3	125
Pentane	109-66-0	1.4	0.4	0.0	64	2	74
Tridecane	629-50-5	1.5	0.4	0.0	12	2	74
Octane	111-65-9	>0.5	0.1	0.0	8,2	2	56

Alcanes- variation de la moyenne (Nétudes ≥ 2), Chen et al. 2021

Composés halogénés

Composé	n° CAS	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				Nombre	
		Moyenne	SD	Min.	Max.	Etudes	Vols
Trichloroethene	79-01-6	0.4	0.2	0.0	41	3	263
Tetrachloroethene/Tetrachloroethylene/Perchloroethylene	127-18-4	7.3	5.7	0.0	304	4	197
p-dichlorobenzene/1,4-dichlorobenzene	106-46-7	2.4	2.9	0.0	228	3	183

Dichloromethane/methylene chloride 75-09-2 1.4 1 0.0 72 2 132

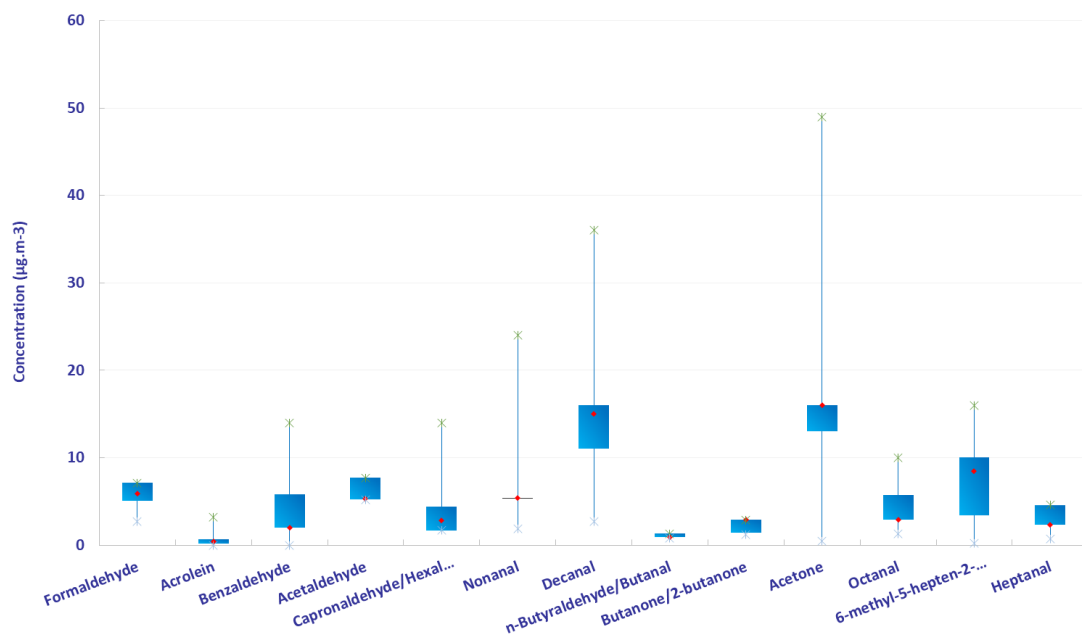


Composés carbonylés :

Tableau 1 : Composés carbonylés (mesurés dans au moins 2 études), classé par nombre de vols (vols non fumeurs) - à partir de R. Chen, Fang, et al. 2021.

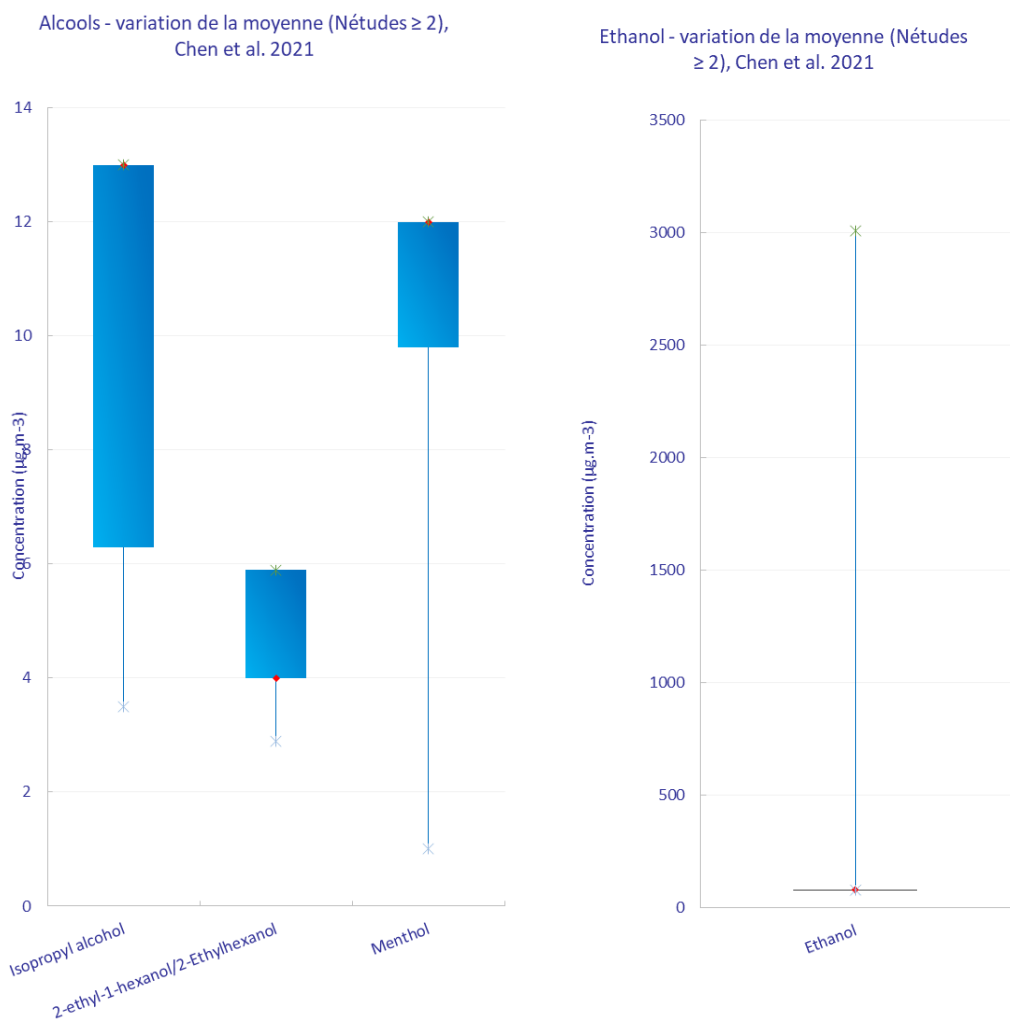
Composé	n° CAS	Concentration (µg/m ³)				Nombre	
		Moyenne	SD	Min.	Max.	Etudes	Vols
Acrolein	107-02-8	< 0.8	1	0.0	53	4	248
Formaldehyde	50-00-0	5.4	1.5	0.0	44	4	248
Benzaldehyde	100-52-7	>2.5	2	0.0	106	5	247
Acetaldehyde	75-07-0	6.4	1.2	0.3	90	3	240
Capronaldehyde/Hexaldehyde/Hexanal	66-25-1	5.2	4.8	0.0	37	4	234
Nonanal	124-19-6	7.8	5.6	0.0	89	5	191
Decanal	112-31-2	14	5	0.0	64	4	186
n-Butyraldehyde/Butanal	123-72-8	1.0	0.2	0.0	15	2	177
Butanone/2-butanone	78-93-3	2.4	0.8	0.0	32	2	152
Acetone	4468-52-4	14	5.6	<LOD	384	4	139
Octanal	124-13-0	4.2	1.8	0.0	31	3	135
6-methyl-5-hepten-2-one/6-MHO	129085-68-3	7.0	3.5	0.2	73	4	122
Heptanal	111-71-7	3.2	1.3	0.0	20	2	121

Composés carbonylés - variation de la moyenne (Nétudes ≥ 2), Chen et al. 2021



Alcools

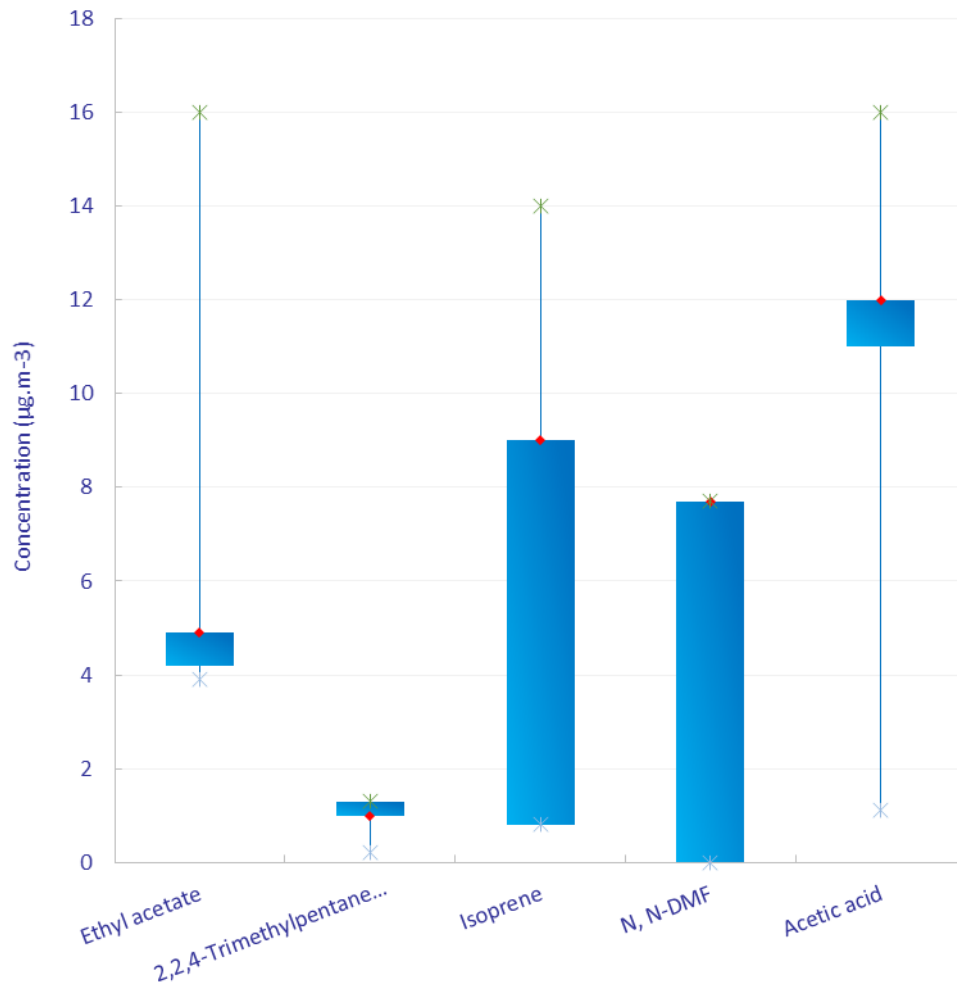
Composé	n° CAS	Concentration (µg/m ³)				Nombre	
		Moyenne	SD	Min.	Max.	Etudes	Vols
Isopropyl alcohol	67-63-0	10	3.4	0.0	248	2	132
2-ethyl-1-hexanol/2-Ethylhexanol	104-76-7	4.7	1	0.1	30	2	120
Menthol	15356-70-4/491-02-1	9.6	3.6	0.1	61	2	83
Ethanol	64-17-5	386	899	7.0	5453	2	77



Autres : Ester – Alcène - Amide –acide carboxylique

Composé	n° CAS	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				Nombre	
		Moyenne	SD	Min.	Max.	Etudes	Vols
Ethyl acetate	141-78-6	8.5	4.4	0.0	68	3	183
2,2,4-Trimethylpentane dioldiisobutyrate	NO	1.1	0.3	0.0	69	2	152
Isoprene	78-79-5	6.8	4.9	0.1	50	3	183
N, N-dimethylformamide/Dimethylformamide	68-12-2	<6.8	3.9	0.0	541	2	120
Acetic acid	64-19-7	11	2.7	0.1	59	3	88

Autres variation de la moyenne (Nétudes ≥ 2), Chen et al. 2021



Annexe 17. Détails des données pour les OP et RDF

Tableau : mesures de TCP et autres organosphosphates

Author	Sampling Method	Sampling Events	Sampling / Analysis Method	*Contaminant of Concern	Measure of Center - Concentration			Detect by Sample
					Mean	Median	Max Measured Concentration	
Allen and Stapleton et al, 2013	Dust sampling-Active	19 Flights**	Cellulose extraction thimble- Vacuum - GCMS, LCMSMS	TDCPP		2100, 5600	22000	100%
Crump, Harrison et Walton 2011a, 2011b	Air sampling-Active	100 Flights	Quartz wool+ TENAX TA Sorbent Tubes	ToCP	0.07µg/m ³		22.8µg/m ³	<5%
				TCPs	0.14µg/m ³		28.5µg/m ³	<6%
				TBP	1.07µg/m ³		21.8µg/m ³	NA
	Air sampling-Active	32 Flights**	Porapak Q and cellulose filters Sorbant tubes	TCP	2.90µg/m ³		51.3µg/m ³	NA
Denola et al, 2011	Air sampling-Passive	20 Flights	Heat exchanger and Coalescer bags from aircraft GC-MS	ToCP	<LOD		<LOD	NA
				TCP	Detected- NQ		NQ	NA
				Total TCPs- Climb	25 ng/m ³	5.9 ng/m ³	155 ng/m ³	40%
	Total TCPS- Cruise	4.7 ng/m ³	2.9 ng/m ³	17 ng/m ³	45%			

de Ree et al, 2014 (Referencing Dutch TNO Study)	Air sampling -Active			Total TCPs- Decent	15 ng/m ³	6.0 ng/m ³	66 ng/m ³	50%
				Total TCPs- Full Flight	6.9 ng/m ³	2.9 ng/m ³	32 ng/m ³	45%
				ToCP	<LOD		NA	NA
				TCPs (wipe sampling)	<0.1 ng/cm ²		NA	NA
He et al, 2018	Dust Sampling	5 Flights**	GC-MS/MS	ΣOPFR	190ug/g***	NA	NA	NA
Rosenberger, 2018	Air sampling- Active	17 Flights	Quartz filter and polyurethane foam	Organophosphates- TBP	0.09µg/m ³ , 0.05µg/m ³ (cabin,cockpit)	0.09µg/m ³ , 0.03µg/m ³	0.22µg/m ³ , 0.16µg/m ³	NA
				TiBP	0.55µg/m ³ , 0.72µg/m ³	0.43µg/m ³ , 0.63µg/m ³	1.99µg/m ³ , 1.73µg/m ³	NA
				TCEP	0.007µg/m ³ , 0.12µg/m ³	0.005µg/m ³ , 0.04µg/m ³	0.07µg/m ³ , 4.44µg/m ³	NA
				TCPP	0.16µg/m ³ , 0.62µg/m ³	0.17µg/m ³ , 0.39µg/m ³	0.40µg/m ³ , 3.73µg/m ³	NA
				TDCPP	0.003µg/m ³ , 0.011µg/m ³	0.003µg/m ³ , 0.008µg/m ³	0.010µg/m ³ , 0.035µg/m ³	NA
				TPP	0.028µg/m ³ , 0.013µg/m ³	0.028µg/m ³ , 0.011µg/m ³	0.056µg/m ³ , 0.043µg/mv	NA
				TEBP	1.2ug/m ³ , 0.27µg/m ³	0.11µg/m ³ , 0.10µg/m ³	2.37µg/m ³ , 1.43µg/m ³	NA

				DPEHP	0.03µg/m ³ , 0.03ug/m3	0.02µg/m ³ , 0.02ug/m3	0.155µg/m ³ , 0.151ug/m3	NA
				TEHP	0.01ug/m3, 0.01ug/m3	0.009ug/m3, 0.009ug/m3	0.025ug/m3, 0.022ug/m3	NA
				TXP	<LOD	<LOD	<LOD	NA
				Summed OPs	0.916ug/m3, 1.633ug/m3	0.65ug/m3, 1.13ug/m3	4.65ug/m3, 8.50ug/m3	NA
				Total TCP	0.024ug/m3, 0.065ug/m3	0.019ug/m3, 0.020ug/m3	0.11ug/m3, 0.981ug/m3	NA
				OPs- Triisobutyl phosphate (ug/m3)	0.086, 0.016 (Bleed, Non- Bleed)		NA	NA
				TnBP	0.58, 0.24		NA	NA
				Tris(chloroethyl) phosphate	0.028, 0.007		NA	NA
				T CPP	0.4, 0.50		NA	NA
Schuchardt et al, 2019	Air sampling -Active	177 Flights	Quartz filter + PUR foam	Tris(1,3- dichloroisopropyl) phosphate	0.0095, 0.005		NA	NA
				TPP	0.012, 0.006		NA	NA
				Tris(butoxyethyl) phosphate	0.14, 0.035		NA	NA
				Diphenyl-2- ethylhexylphosphate	0.018, 0.013		NA	NA
				Tris(ethylhexyl)phosphate	0.0093, <LOD		NA	NA

			ToCP	<LOD, <LOD	NA	NA
			TompCP	<LOD, <LOD	NA	NA
			ToomCP	<LOD, <LOD	NA	NA
			Toop/ommCP	<LOD, <LOD	NA	NA
			ToppCP	<LOD, <LOD	NA	NA
			TmCP	0.0072, 0.007	NA	NA
			TmmpCP	0.0093, 0.010	NA	NA
			TmppCP	0.0068, 0.006	NA	NA
			TpCP	0.003, 0.003	NA	NA
			Trixylyl phosphate	0.0115, <LOD	NA	NA
			Total TCP	0.027, 0.026	NA	NA
			Total OPs	1.24, 0.820	NA	NA
	Air sampling-Active	47 Flights	Millex HV filter	TCP -Air sampling	<LOD	5.9ug/m3 4%
				TPP Air	0.11ug/m3	0.11ug/m3 2%
				TnBP Air	0.47ug/m3	4.1ug/m3 100%
Solbu et al, 2011				DBPP Air	0.12ug/m3	0.77ug/m3 92%
	Air sampling-Passive		Klinion 5x5cm sterile non-woven compresses	TCP -Wipe sampling	<LOD, 1.15 ng/dm/day (Jet, Prop)	8.3ng/dm/day 39%
				TiBP wipe	<LOD, <LOD	0.42ng/dm/day 3%

				TnBP wipe	<LOD, 0.10ng/dm/day	19.0ng/dm/day	37%
				DBPP wipe	<LOD, 0.13ng/dm/day	20ng/dm/day	42%
				TPP wipe	0.37, 0.76ng/dm/day	15ng/dm/day	74%
				TCP HEPA	2.6ng/g/hr	42ng/g/hr	100%
van Netten, 2009	Air sampling- Active	2 Flights	Novel Aircraft Air Monitor	Total TCP	72ng/m3 (adjusted)	108ng/m3	100%
Van Netten 2000	Air sampling- Active	5 Flights	Fliter Cassette	Total TCP	<LOD	NA	NA

Tableau : Mesures de retardateurs de flamme bromés (=> tableau à reprendre, 1 étude dans l'air, 2 dans les poussières)

Author	Sampling Method	Sampling Events	Sampling / Analysis Method	*Contaminant of Concern	Mean	Median	Max Measured Concentration	Detect by Sample
Allen et al, 2013	Air sampling -Active	59 Flights	Polyurethane foam and XAD-2 sorbent - GCMS	PBDE 47		1.3 ng/m3	20 ng/m3	63%
				PBDE 99		<1.3 ng/m3	41 ng/m3	22%
				PBDE 100		<0.4 ng/m3	9.4 ng/m3	29%
				PBDE 183		<1.3 ng/m3	98 ng/m3	32%
				PBDE 209		<1.2 ng/m3	2100ng/m3	42%
				PBDEs (ng/g)- BDE28, 33		54, 33 (floor, vent)	270	98%
Allen and Stapleton et al, 2013	Dust sampling-Active	19 Flights**	Cellulose extraction thimble- Vacuum - GCMS, LCMSMS	BDE47		950, 3500	19000	100%
				BDE49		40, 65	6300	76%
				BDE66		45, 230	1500	98%
				BDE75		370 310	47000	100%
				BDE85, 155		76, 200	2900	98%
				BDE99		950, 4200	37000	100%
			BDE100		180, 630	8900	98%	

				BDE138	20, 62	680	84%
				BDE153	230, 630	5300	100%
				BDE154	120, 280	4700	98%
				BDE183	620, 390	9100	100%
				BDE209	495000, 473000	2600000	100%
				BIBPE	330, 1300	48000	100%
				HBB	100, 45	540	74%
				alpha-HBCD	2300, 1600	290000	84%
				beta-HBCD	310, 230	75000	69%
				γ-HBCD	4500, 7600	700000	98%
				Total HBCD	7600, 10000	1100000	100%
				TBB	350, 740	5000	100%
				TBPH	640, 1200	3600	100%
He et al, 2018	Dust Sampling	5 Flights**	GC-MS/MS	ΣPBDEs	8.1ug/g***	NA	NA

Notes



AGENCE NATIONALE DE SÉCURITÉ SANITAIRE
de l'alimentation, de l'environnement et du travail

14 rue Pierre et Marie Curie 94701 Maisons-Alfort Cedex
Tél : 01 42 76 40 40
www.anses.fr — @Anses_fr