

Creative commons : Paternité - Pas d'Utilisation Commerciale -
Pas de Modification 2.0 France (CC BY-NC-ND 2.0)



<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/fr>

2017

THESE n°125

T H E S E

pour le DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN PHARMACIE

présentée et soutenue publiquement le 14 Décembre 2017 par

Mlle. BOSSARD Marie-Lorraine

Née le 17 Mars 1994

A Nancy (54)

**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.**

JURY

M. GUITTON Jérôme, Professeur

M. MULLOT Jean-Ulrich, Professeur agrégé du Val-de-Grâce

M. RENARD Christophe, Professeur agrégé du Val-de-Grâce

UNIVERSITE CLAUDE BERNARD LYON 1

- | | |
|---|-----------------------|
| • Président de l'Université | M. Frédéric FLEURY |
| • Présidence du Conseil Académique | M. Hamda BEN HADID |
| • Vice-Président du Conseil d'Administration | M. Didier REVEL |
| • Vice-Président de la Commission Recherche | M. Fabrice VALLEE |
| • Vice-Président de la Formation et de la Vie Universitaire | M. Philippe CHEVALIER |

Composantes de l'Université Claude Bernard Lyon 1

SANTE

- | | |
|---|--|
| • UFR de Médecine Lyon Est | Directeur : M. Gilles RODE |
| • UFR de Médecine Lyon Sud Charles Mérieux | Directeur : Mme Carole BURILLON |
| • Institut des Sciences Pharmaceutiques et Biologiques | Directrice : Mme Christine VINCIGUERRA |
| • UFR d'Odontologie | Directeur : M. Denis BOURGEOIS |
| • Institut des Techniques de Réadaptation | Directeur : M. Yves MATILLON |
| • Département de formation et centre de recherche en Biologie Humaine | Directeur : Anne-Marie SCHOTT |

SCIENCES ET TECHNOLOGIES

- | | |
|--|----------------------------------|
| • Faculté des Sciences et Technologies | Directeur : M. Fabien DE MARCHI |
| • UFR de Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives (STAPS) | Directeur : M. Yannick VANPOULLE |
| • Ecole Polytechnique Universitaire de Lyon (ex ISTIL) | Directeur : M. Pascal FOURNIER |
| • I.U.T. LYON 1 | Directeur : M. Christophe VITON |
| • Institut des Sciences Financières et d'Assurance (ISFA) | Directeur : M. Nicolas LEBOISNE |
| • ESPE | Directeur : M. Alain MOUGNIOTTE |

UNIVERSITE CLAUDE BERNARD LYON 1
ISPB -Faculté de Pharmacie Lyon

LISTE DES DEPARTEMENTS PEDAGOGIQUES

DEPARTEMENT PEDAGOGIQUE DE SCIENCES PHYSICO-CHIMIQUE ET PHARMACIE GALENIQUE

- **CHIMIE ANALYTIQUE, GENERALE, PHYSIQUE ET MINERALE**

Monsieur Raphaël TERREUX (Pr)
Madame Julie-Anne CHEMELLE (MCU)
Madame Anne DENUZIERE (MCU)
Monsieur Lars-Petter JORDHEIM (MCU-HDR)
Madame Christelle MACHON (MCU-PH)

- **PHARMACIE GALENIQUE -COSMETOLOGIE**

Madame Marie-Alexandrine BOLZINGER (Pr)
Madame Stéphanie BRIANCON (Pr)
Madame Françoise FALSON (Pr)
Monsieur Hatem FESSI (Pr)
Monsieur Fabrice PIROT (PU - PH)
Monsieur Eyad AL MOUAZEN (MCU)
Madame Sandrine BOURGEOIS (MCU)
Madame Ghania HAMDİ-DEGOBERT (MCU-HDR)
Monsieur Plamen KIRILOV (MCU)
Madame Giovanna LOLLO (MCU)
Monsieur Damien SALMON (AHU)

- **BIOPHYSIQUE**

Madame Laurence HEINRICH (MCU)
Monsieur David KRYZA (MCU – PH - HDR)
Madame Sophie LANCELOT (MCU - PH)
Monsieur Cyril PAILLER-MATTEI (MCU-HDR)
Madame Elise LEVIGOUREUX (AHU)

DEPARTEMENT PEDAGOGIQUE PHARMACEUTIQUE DE SANTE PUBLIQUE

- **DROIT DE LA SANTE**

Monsieur François LOCHER (PU – PH)
Madame Valérie SIRANYAN (MCU - HDR)

- **ECONOMIE DE LA SANTE**

Madame Nora FERDJAOUI MOUMJID (MCU - HDR)

Madame Carole SIANI (MCU – HDR)
Monsieur Hans-Martin SPÄTH (MCU)

- **INFORMATION ET DOCUMENTATION**

Monsieur Pascal BADOR (MCU - HDR)

- **HYGIENE, NUTRITION, HYDROLOGIE ET ENVIRONNEMENT**

Madame Joëlle GOUDABLE (PU – PH)

- **INGENIERIE APPLIQUEE A LA SANTE ET DISPOSITIFS MEDICAUX**

Monsieur Gilles AULAGNER (PU – PH)
Monsieur Daniel HARTMANN (Pr)

- **PHARMACOLOGIE**
 - Monsieur Michel TOD (PU – PH)
 - Monsieur Luc ZIMMER (PU – PH)
 - Monsieur Roger BESANCON (MCU)
 - Monsieur Laurent BOURGUIGNON (MCU-PH)
 - Madame Evelyne CHANUT (MCU)
 - Monsieur Nicola KUCZEWSKI (MCU)
 - Madame Dominique MARCEL CHATELAIN (MCU-HDR)
- **COMMUNICATION**
 - Monsieur Ronald GUILLOUX (MCU)
- **ENSEIGNANTS ASSOCIES TEMPORAIRES**
 - Monsieur Olivier CATALA (Pr-PAST)
 - Madame Corinne FEUTRIER (MCU-PAST)
 - Madame Mélanie THUDEROZ (MCU-PAST)

DEPARTEMENT PEDAGOGIQUE DES SCIENCES BIOMEDICALES A

- **IMMUNOLOGIE**
 - Monsieur Guillaume MONNERET (PU-PH)
 - Madame Cécile BALTER-VEYSSEYRE (MCU - HDR)
 - Madame Morgane GOSSEZ (AHU)
 - Monsieur Sébastien VIEL (AHU)
- **HEMATOLOGIE ET CYTOLOGIE**
 - Madame Christine VINCIGUERRA (PU - PH)
 - Madame Brigitte DURAND (MCU - PH)
 - Monsieur Yohann JOURDY (AHU)
- **MICROBIOLOGIE ET MYCOLOGIE FONDAMENTALE ET APPLIQUEE AUX BIOTECHNOLOGIE INDUSTRIELLES**
 - Monsieur Patrick BOIRON (Pr)
 - Monsieur Jean FRENEY (PU – PH)
 - Monsieur Frédéric LAURENT (PU-PH-HDR)
 - Madame Florence MORFIN (PU – PH)
 - Monsieur Didier BLAHA (MCU)
 - Madame Ghislaine DESCOURS (MCU-PH)
 - Madame Anne DOLEANS JORDHEIM (MCU-PH)
 - Madame Emilie FROBERT (MCU - PH)
 - Madame Véronica RODRIGUEZ-NAVA (MCU-HDR)
- **PARASITOLOGIE, MYCOLOGIE MEDICALE**
 - Monsieur Philippe LAWTON (Pr)
 - Madame Nathalie ALLIOLI (MCU)
 - Madame Samira AZZOUZ-MAACHE (MCU - HDR)

DEPARTEMENT PEDAGOGIQUE DES SCIENCES BIOMEDICALES B

- **BIOCHIMIE – BIOLOGIE MOLECULAIRE - BIOTECHNOLOGIE**

Madame Pascale COHEN (Pr)
Madame Caroline MOYRET-LALLE (Pr)
Monsieur Alain PUISIEUX (PU - PH)
Madame Emilie BLOND (MCU-PH)
Monsieur Karim CHIKH (MCU - PH)
Madame Carole FERRARO-PEYRET (MCU - PH-HDR)
Monsieur Boyan GRIGOROV (MCU)
Monsieur Hubert LINCET (MCU-HDR)
Monsieur Olivier MEURETTE (MCU)
Madame Angélique MULARONI (MCU)
Madame Stéphanie SENTIS (MCU)
Monsieur Anthony FOURIER (AHU)

- **BIOLOGIE CELLULAIRE**

Madame Bénédicte COUPAT-GOUTALAND (MCU)
Monsieur Michel PELANDAKIS (MCU - HDR)

- **INSTITUT DE PHARMACIE INDUSTRIELLE DE LYON**

Madame Marie-Alexandrine BOLZINGER (Pr)
Monsieur Daniel HARTMANN (Pr)
Monsieur Philippe LAWTON (Pr)
Madame Sandrine BOURGEOIS (MCU)
Madame Marie-Emmanuelle MILLION (MCU)
Madame Alexandra MONTEBAULT (MCU)
Madame Angélique MULARONI (MCU)
Madame Valérie VOIRON (MCU - PAST)

- **Assistants hospitalo-universitaires sur plusieurs départements pédagogiques**

Monsieur Alexandre JANIN

- **Attachés Temporaires d'Enseignement et de Recherche (ATER)**

Monsieur Karim MILADI (85^{ème} section)
Monsieur Antoine ZILLER (87^{ème} section)

Pr : Professeur

PU-PH : Professeur des Universités, Praticien Hospitalier

MCU : Maître de Conférences des Universités

MCU-PH : Maître de Conférences des Universités, Praticien Hospitalier

HDR : Habilitation à Diriger des Recherches

AHU : Assistant Hospitalier Universitaire

PAST : Personnel Associé Temps Partiel

ECOLE DE SANTE DES ARMEES

A Monsieur le Médecin Général Inspecteur H. FOEHRENBACH

Professeur Agrégé du Val-de-Grâce
Officier de la Légion d'Honneur
Officier de l'Ordre National du Mérite
Chevalier Palmes académiques
Commandant l'Ecole de Santé des Armées

A Monsieur le Médecin Chef des Services T. FUSAI

Praticien certifié, MD, PhD, DR1
Officier de la Légion d'Honneur
Titulaire de la Croix de Guerre des TOE - Etoile d'argent
Croix de la valeur militaire avec citation
Chevalier Palmes académiques
TST argent
Commandant en second et Directeur de la formation des praticiens de l'Ecole de Santé des Armées

A Monsieur le Médecin en Chef O. COSTE

Praticien certifié, MD, PhD
TST bronze
Adjoint au Directeur de la formation des praticiens de l'Ecole de Santé des Armées

A Monsieur le Médecin en chef R. MICHEL

Professeur Agrégé du Val-de-Grâce
Chevalier Ordre National du Mérite
TST (Travaux scientifiques ou techniques) Argent
Chevalier des Palmes Académiques
Adjoint au Directeur de la formation des praticiens de l'Ecole de Santé des Armées

A Monsieur le Médecin en chef O. PROST

Chevalier de l'Ordre National du Mérite
Chef du Département d'Appui à la Formation de l'Ecole de Santé des Armées

REMERCIEMENTS

**A notre Président de thèse
Monsieur le Professeur Jérôme GUITTON**

*Nous avons eu le privilège de recevoir votre enseignement à la faculté.
Vous nous avez fait l'honneur d'accepter la présidence de notre jury.
Vos conseils, vos orientations et votre expérience nous ont été précieux.
Veuillez recevoir l'expression de nos sincères remerciements et de notre profond respect.*

**A notre directeur de thèse
Monsieur le Pharmacien en Chef Jean-Ulrich MULLOT**

*Vous nous avez témoigné votre confiance en nous proposant ce travail ainsi que tout au long
de sa réalisation.
Votre disponibilité, vos conseils et votre attention nous ont été précieux. Soyez remercié
d'avoir pris en compte les particularités de la formation à CPE ainsi que pour votre accueil
régulier au LASEM.
Soyez assuré de notre gratitude et de notre reconnaissance.*

**Au membre de notre jury
Monsieur le Professeur agrégé du Val-de-Grâce Christophe RENARD**

*Vous nous avez fait l'honneur d'accepter de juger notre travail.
Votre participation à notre étude nous est précieuse.
Soyez assuré de notre plus grande reconnaissance.*

A Hilaire, mon cher fiancé. Pour ta bienveillance de toujours et ton inégalable bonté, dès notre première rencontre à la Boîte. Merci pour ton attention et ton intérêt dans ce que j'entreprends, ton exemple de travail sérieux et rigoureux qui suscite mon admiration. Merci d'être cet homme solide sur lequel je m'appuie aujourd'hui, comme un avant-goût du soutien mutuel que nous nous devons demain et tout au long de notre vie.

A mes parents. Merci de m'avoir toujours encouragée dans mon travail et d'avoir éveillé en moi le sens du bien, du courage, de l'effort, du travail bien fait et de tant d'autres choses ! Merci à vous, Papa, pour votre goût de la chose militaire, qui est loin d'être étranger à ma place d'aujourd'hui ! Merci à vous, Maman, pour votre disponibilité et vos conseils, votre éternelle attention et votre constant dévouement pour faire grandir et éduquer vos enfants !

A mes frères et sœurs (et pièces rapportées) qui de près ou de loin ont suivi l'avancé de ce travail. Merci à Marie-Clotilde pour ta douceur et ta gentillesse, à Pierre-Emmanuel pour avoir repris le flambeau de l'humour paternel et pour ta force tranquille, à Priscille pour la touche de modernité et l'agréable brin de folie que tu apportes et à Quitterie pour ton imagination, tes rêves et tes talents d'artiste égayant la maison.

A mes grands-parents. Merci pour votre soutien précieux, vos fréquentes visites, votre accueil régulier et si chaleureux et vos mille délicatesses et attentions pour m'aider à bien travailler ! Merci à Papy pour ta serviabilité remarquable et discrète, ta relecture attentive et efficace et les bons conseils sur cette thèse. Merci à Mamy pour ton aide dans la préparation de la soutenance ; si cette thèse avait dû être traduite en Anglais, je sais sans nul doute que j'aurais pu compter sur ton aide !

A Marie et Hélène, mes chères amies de pharmacie. Pour votre présence quotidienne sur les bancs de la fac. Ce fut un plaisir de vous retrouver chaque matin ! Merci pour ces années sympathiques passées ensemble dans les vieux amphithéâtres, les salles de TP ou le jardin des pharmaciens, passage obligé pour nos emblématiques examens de botanique !

A Marie et Marie, mes colocataires de la Marinière. Pour tous ces bons moments passés, particulièrement réunies autour d'un bon « dîner de coloc ». Qu'il est bon de se sentir chez soi !

Aux pharmas de CPE. Ce fut un plaisir de mieux vous connaître en quittant les études trop classiques de pharmacie pour nous lancer dans le monde des ingénieurs chimistes... Que d'inquiétudes, de découragements, de galère mais finalement de réussites partagées !

A mon parrain, Wilfried. Pour ton aide et ta disponibilité pour répondre à toutes mes questions. Merci pour ta bienveillance d'ancien !

A Alex, Mac, Manon, JB, pharmas de la promo CHAVIALLE, que je laisse partir avec regret au Val-de-Grâce. Merci pour ces quelques années passées ensemble, à la fac ou à la Boîte dans le petit monde des potards.

A ma bizuthe Coralie, que je retrouverai avec joie au Val-de-Grâce en changeant de promo !

A ma famille potarde, que j'ai toujours plaisir à retrouver autour d'un traditionnel repas ou d'un goûter famille ; les plus anciens : Dominique, Charlotte, Antoine, Wilfried, Laëtitia, comme les plus jeunes : Coralie, François, Cyril, Anne-Laure, Cyril.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES ILLUSTRATIONS	12
Liste des figures	13
Liste des tableaux	15
Liste des annexes	16
LISTE DES ABRÉVIATIONS	17
INTRODUCTION	21
CONNAISSANCES ET INCERTITUDES AU SUJET DU SYNDROME AÉROTOXIQUE	23
1. Historique de la prise de conscience	24
2. Origine des polluants dans les cabines d'avion	26
2.1. Approvisionnement de la cabine en air : « le bleed air »	26
2.2. Principales sources de pollution	29
3. Occurrence des « fumes events »	33
4. Dangers des polluants identifiés dans les cabines d'avion	36
4.1. Etudes des dangers des organophosphorés	36
4.2. Etude des dangers d'autres molécules	39
4.3. Effets d'autres caractéristiques physicochimiques des cabines d'avion	39
5. Effets de santé rapportés par les équipages	41
5.1. Qualitativement	41
5.2. Fréquence	42
5.3. Association entre effets de santé et qualité de l'air	43
5.3.1. <i>Rappel des méthodes épidémiologiques</i>	43
5.3.2. <i>Applications dans le cadre du syndrome aérotoxique</i>	44
6. Limites des études actuellement réalisées	51
OBJECTIFS	53
MATÉRIELS ET MÉTHODES	55
RÉSULTATS	57
1. Polluants rapportés et gammes de concentration	58
1.1. Etude de la composition des huiles moteurs	58
1.2. Polluants détectés dans l'air	60
1.2.1. <i>Composés organiques semi-volatils (COSV)</i>	61
1.2.2. <i>Composés organiques volatils (COV)</i>	64

1.2.3. Paramètres généraux	71
2. Moyens de mesure mis en œuvres, avantages et inconvénients	72
2.1. Echantillonnage des surfaces	72
2.2. Echantillonnage de l'air	74
2.2.1. Méthodes à long terme	74
2.2.2. Méthodes à court terme	75
3. Contraintes associées à notre objectif	88
4. Proposition de moyens de mesure adaptés à notre objectif	90
DISCUSSION	97
CONCLUSION	102
ANNEXES	105
BIBLIOGRAPHIE	130

TABLE DES ILLUSTRATIONS

LISTE DES FIGURES

Figure 1- Vue d'ensemble du système de ventilation d'un avion (d'après Hildre et Jensen ¹).....	27
Figure 2- Vue schématique d'une section de moteur (d'après Hildre et Jensen ¹)	28
Figure 3- Schéma du flux du "bleed air" dans le système de prélèvement d'un avion (d'après Winder ¹³)	28
Figure 4- Schéma du système pneumatique (Airbus A320) (d'après Air Accident Investigation Unit Ireland ²⁵)	29
Figure 5- Contributions en masse de différentes sources aux composés volatils organiques totaux dans l'air de cabine (d'après Wang et al. ¹⁵)	31
Figure 6- Contributions des différentes sources de contaminations de l'air de cabine	32
Figure 7- « Fume event » sévère avec fumée visible	33
Figure 8- Indice composite pour le taux d'incident en fonction du modèle d'avion (d'après Shehadi et al. ³⁶)	35
Figure 9- Structure générale des organophosphorés.....	36
Figure 10- Conséquences d'un empoisonnement par les organophosphorés (d'après Hildre et Jensen ¹)	37
Figure 11- Structures chimiques des triaryl et trialkyl phosphates ignifugeants	47
Figure 12- Niveau des métabolites des organophosphorés dans les urines des membres d'équipage (n=132) et contrôles issus de la population générale (n=30 pour BCEP, DPP, DnCP et DpCP, n=25 pour BCPP, DBP) (d'après Schindler et al. ²⁸).....	47
Figure 13- Métabolisme in vivo du ToCP (d'après Liyasova et al. ⁶⁹)	48
Figure 14- Composition du kit mobile ChE check pour la détermination sur site de l'activité de l'AChE et de la BChE dans le sang total (d'après Worek et al. ⁷¹)	49
Figure 15- Valeurs de référence des activités de l'AChE et de la BChE dans le sang total et le plasma (d'après Worek et al. ⁷¹)	49
Figure 16- Isomères du TCP (d'après Bezold ⁸²)	61
Figure 17- Résumé des méthodes d'échantillonnage des surfaces	73
Figure 18- Résumé des méthodes d'échantillonnage des organophosphorés à long terme	75

Figure 19- Résumé des méthodes d'échantillonnage des composés organiques volatils et semi-volatils	76
Figure 20- Schéma du montage d'échantillonnage complet (12 cm) avec la cassette contenant le filtre (1), le tube adsorbant (3), des surfaces inertes pour le montage (2,4) et le connecteur à la pompe d'échantillonnage (5) (d'après Solbu^{92,94}).....	77
Figure 21- Appareil d'échantillonnage constitué d'une tête de prélèvement équipée d'un manchon pour retenir les mousses de polyuréthane (norme AFNOR⁹⁵).....	77
Figure 22- Vue ouverte de l'échantillonneur en cas d'incident (d'après Solbu^{92,96})	78
Figure 23- Photo de l'échantillonneur en cas d'incident (d'après Solbu⁹²)	78
Figure 24- Montage avec filtre et pompe pour échantillonnage de courte durée (10-20min) (d'après Hanhela et al.¹⁸).....	79
Figure 25- Echantillonneur de van Netten (d'après van Netten⁹⁹)	79
Figure 26- Montage avec adsorbant et pompe pour échantillonnage de longue durée (>3heures) (d'après Hanhela et al.¹⁸)	80
Figure 27- Résumé des méthodes d'échantillonnage des organophosphorés	80
Figure 28- Résumé des méthodes d'échantillonnage pour aldéhydes et cétones	82
Figure 29- Prototype de l'échantillonneur en verre recouvert de polymère dans son contenant en aluminium (d'après Maddalena et McKone³²).....	82
Figure 30- Résumé des méthodes d'échantillonnage des hydrocarbures aromatiques polycycliques et des aromatiques.....	83
Figure 31- Principe et photo du compteur de particules à détection photométrique (d'après EASA⁹)	84
Figure 32- Résumé des méthodes d'échantillonnage pour les paramètres généraux	85
Figure 33- Résumé des méthodes d'échantillonnages des autres molécules	87
Figure 34- Méthode d'échantillonnage Fraunhofer IBP (d'après Bezold⁸²)	87
Figure 35- Mallette du projet AviSan.....	94
Figure 36- Approches du syndrome aérotoxique (d'après Winder¹³)	98

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1- Synthèse des types d'études épidémiologiques (d'après Centre Cochrane Français ⁶⁷)	44
Tableau 2- Durée d'échantillonnage, fréquence et concentrations (minimales, maximales, moyennes) de TCP mesurées dans l'air ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	62
Tableau 3- Fréquence et concentrations (minimales, maximales, moyennes) de TCP mesurées sur les surfaces (ng/dm^2)	62
Tableau 4- Concentrations (minimales, maximales, moyennes) de formaldéhyde mesurées dans l'air ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	65
Tableau 5- Fréquence et concentrations (minimales, maximales, moyennes) d'acétone mesurées dans l'air ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	65
Tableau 6- Fréquence et concentrations (minimales, maximales, moyennes) d'acide acétique mesurées dans l'air ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	66
Tableau 7- Fréquence et concentrations (minimales, maximales, moyennes) de toluène mesurées dans l'air ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	67
Tableau 8- Fréquence et concentrations (minimales, maximales, moyennes) d'undécane C11 mesurées dans l'air ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	68
Tableau 9- Fréquence et concentrations (minimales, maximales, moyennes) de limonène mesurées dans l'air ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	68
Tableau 10- Fréquence et concentrations (minimales, maximales, moyennes) d'éthanol mesurées dans l'air ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	69
Tableau 11- Fréquence et concentrations (minimales, maximales, moyennes) de tétrachloroéthène ou perchloroéthylène mesurées dans l'air ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	70
Tableau 12- Limites de détection théoriques (NIOSH)	94

LISTE DES ANNEXES

<i>Annexe 1- Origine des différents polluants</i>	<i>106</i>
<i>Annexe 2- Questionnaire d'investigation autour d'un « fume event » (d'après BFU³⁷)</i>	<i>108</i>
<i>Annexe 3- Revue de littérature des différents effets de santé rapportés et de leur fréquence</i>	<i>110</i>
<i>Annexe 4- Limites internationales d'exposition pour les organophosphorés (d'après Lamb et al.²¹)</i>	<i>111</i>
<i>Annexe 5- Liste des composés retrouvés dans les huiles neuves^{1, 2, 8, 13, 49, 65}</i>	<i>112</i>
<i>Annexe 6- Liste des composés retrouvés dans les huiles usagées^{2, 24, 29, 80}</i>	<i>113</i>
<i>Annexe 7- Tableau de synthèse des études sur les organophosphorés ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)</i>	<i>116</i>
<i>Annexe 8- Tableau de synthèse des études sur les classes chimiques moins documentées ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)</i>	<i>117</i>
<i>Annexe 9- Tableau de synthèse des études sur les aldéhydes ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)</i>	<i>118</i>
<i>Annexe 10- Tableau de synthèse des études sur les cétones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)</i>	<i>119</i>
<i>Annexe 11- Tableau de synthèse des études sur les acides ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)</i>	<i>120</i>
<i>Annexe 12- Tableau de synthèse des études sur les aromatiques ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)</i>	<i>121</i>
<i>Annexe 13- Tableau de synthèse des études sur les alcanes ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)</i>	<i>122</i>
<i>Annexe 14- Tableau de synthèse des études sur les alcènes ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)</i>	<i>123</i>
<i>Annexe 15- Tableau de synthèse des études sur les alcools ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)</i>	<i>124</i>
<i>Annexe 16- Tableau de synthèse des études sur les composés halogénés ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)</i>	<i>125</i>
<i>Annexe 17- Tableau de synthèse des études sur les éthers et esters ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)</i>	<i>126</i>
<i>Annexe 18- Tableau de synthèse des études sur les autres paramètres ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)</i>	<i>127</i>
<i>Annexe 19- Tableau de synthèse des méthodes d'échantillonnage ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)</i>	<i>128</i>

LISTE DES ABRÉVIATIONS

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ACC	Bande de charbon activé (Activated Charcoal Cloth)
AChE	Acétylcholine estérase
ACER	Recherche sur l'environnement des cabines d'avion (Airliner Cabin Environment Research)
AFNOR	Association française de normalisation
SLA	Sclérose latérale amyotrophique
ANSES	Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
APU	Groupe auxiliaire de puissance (Auxiliary Power Unit)
ASHRAE	Société américaine des ingénieurs en chauffage, réfrigération et climatisation (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers)
B787	Boeing 787
BCEP	Bis-(2-chloroethyl) phosphate
BChE	Butyryl-cholinesterase
BCPP	Bis-(2-chloroisopropyl) phosphate
BPCO	Bronchopneumopathie chronique obstructive
CBDP	2-(ortho-cresyl)-4 <i>H</i> -1,3,2-benzodioxaphosphoran-2-one
COPIDN	Neuropathie chronique induite par les organophosphorés (Chronic Organophosphate-Induced Delayed Neuropathy)
COT	Comité de toxicité du Royaume-Uni (UK Committee On Toxicity)
COV	Composé organique volatil
COSV	Composé organique semi-volatil
CSC	Absorbant en charbon actif de noix de coco (Coconut Charcoal Sorbent)
DBP	Dibutyl phosphate
DBPP	Dibutyl phényl phosphate
DCM	Dichlorométhane
DmCP	Di-méta-crésyl phosphate
DpCP	Di-para-crésyl phosphate
DMF	Diméthylformamide
DNPH	2,4-Dinitrophénylhydrazine
DPP	Diphényl phosphate

EASA	Agence européenne de sécurité aérienne (European Aviation Safety Agency)
ECS	Système de contrôle de l'environnement (Environmental control system)
FID	Détecteur à ionisation de flamme (Flame Ionisation Detector)
GC	Chromatographie en phase gazeuse (Gas Chromatography)
HAP	Hydrocarbure aromatique polycyclique
HEPA	Filtre à particules aériennes à haute efficacité (High Efficiency Particulate Air)
HPLC	Chromatographie en phase liquide haute performance (High Performance Liquid Chromatography)
IBP	Institut de physique du bâtiment (Institut for Building Physics)
ICAO	Organisation Internationale de l'Aviation Civile (International Civil Aviation Organisation)
INRS	Institut National de Recherche et de Sécurité pour la prévention des maladies professionnelles et des accidents du travail
InVS	Institut de Veille Sanitaire
IR	Infra rouge
IRM	Imagerie par Résonance Magnétique
LASEM	Laboratoire d'analyse, de surveillance et d'expertise de la Marine
LD	Limite de détection
LQ	Limite de quantification
LWW	Lioy-Weisel-Waiman
MCE	Ester de Cellulose Mixte (Mixed Cellulose Ester)
MS	Spectrométrie de masse (Mass Spectrometry)
MtBE	Methyl tert-butyl éther
US-NRC	Conseil national de la recherche des Etats-Unis (National Research Council)
NTE	Estérases Neurotoxiques (Neuropathy Target Esterase)
OP	Organophosphoré
OPIDN	Neuropathie retardée induite par les organophosphorés (Organophosphate-Induced Delayed Neuropathy)
OSHA	Loi sur la santé et la sécurité au travail (Occupational Safety Health Organisation)
PAN	N-phenyl-1-napthylamine
PBDE	Ethers diphenyl polybromés (Polybrominated diphenyl ethers)
PID	Détecteur à photoionisation (Photon Ionization Detector)
PTFE	Polytetrafluoroéthylène

PUF	Mousse de polyuréthane (Polyurethane Foam)
PVC	Polychlorure de vinyle (Polyvinyl chloride)
QMA	Micro-Quartz
RX	Rayons X
SNC	Système nerveux central
TBP	Tributyl phosphate
TCP	Tricresyl phosphate
TCPP	Tris(2-chloroisopropyl)phosphate
TiBP	Tri-iso-butylphosphate
TMPE	Trimethylolpropane ester
TMPP	Trimethylolpropane phosphate
TmCP	Tri-méta-cresyl phosphate
TnBP	Tri-n-butyl phosphate
ToCP	Tri-ortho-cresyl phosphate
TpCP	Tri-para-cresyl phosphate
TPP	Triphenyl phosphate
TXP	Trixylyl phosphate
UHPLC	Chromatographie liquide à ultra-haute performance (Ultra-High Performance Liquid Chromatography)
UV	Ultra-violet
VLEP	Valeurs Limites d'Exposition Professionnelle
XAD	(Hydroxyméthyl-2)pipéridine

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Proposé en 1999 par Winder, Balouet et Hoffman, le terme de « syndrome aérotoxique » désigne certains symptômes observés chez des personnels embarqués. Dans un second temps, ce syndrome a été associé avec l'exposition répétée ou aigüe à de l'air réputé contaminé dans la cabine d'avion. L'intérêt croissant porté à ce sujet au sein du monde scientifique est illustré par le nombre important de publications, récentes et plus anciennes. Des associations de pilotes et de victimes se constituent également pour sensibiliser les personnels et les dirigeants des compagnies aériennes à cette question et pour demander une juste reconnaissance et prise en charge médicale de ce phénomène. C'est dans ce contexte que le récent projet AviSan a été proposé en France. Il s'agit d'étudier les expositions professionnelles dans les cabines d'avion en lien avec les événements accidentels de contamination de l'air ou « fume events ». L'un des objectifs du projet est de documenter et quantifier les concentrations en polluants susceptibles d'entraîner des effets neurotoxiques, en mettant à contribution les membres d'équipage pour les prélèvements. Dans ce but, des méthodes d'échantillonnages rapides et faciles à mettre en œuvre doivent être disponibles, tout en permettant une analyse d'un maximum des polluants pertinents identifiés à ce jour.

Notre travail est le fruit d'une synthèse bibliographique réalisée avec cet objectif et d'une confrontation de cette synthèse avec les contraintes du projet AviSan. Une première partie est consacrée au « syndrome aérotoxique ». La compréhension du problème est, à ce jour, intrinsèquement liée au fonctionnement de l'approvisionnement en air d'un avion, aux produits utilisés et activités réalisées. Différentes sources sont donc recensées. Bien que la fréquence des événements soit variable selon les études, certains effets de santé rapportés semblent concordants et particulièrement associés à la sphère neurologique. La deuxième partie de ce travail aborde les différents polluants recensés jusqu'alors, aussi bien dans l'air que dans les huiles moteurs utilisées. Nous recenserons les différentes méthodes d'échantillonnage utilisées avec leurs avantages et inconvénients. Ces éléments permettent au final de proposer un ensemble de moyens de mesure adaptés pour la réalisation d'une campagne de prélèvements par les membres d'équipage pendant les « fume events ».

CONNAISSANCES ET INCERTITUDES AU SUJET DU SYNDROME AEROTOXIQUE

CONNAISSANCES ET INCERTITUDES AU SUJET DU SYNDROME AEROTOXIQUE

1. Historique de la prise de conscience

L'introduction du terme spécifique de « syndrome aérotoxique » remonte à 1999 par le Docteur Harry Hoffman, le professeur Chris Winder et Jean-Christophe Balouet. Celui-ci regroupe les symptômes observés parmi les membres d'équipage d'aéronefs dans un premier temps, puis rapidement et sans qu'il s'agisse initialement d'une volonté expresse de ses fondateurs, ce terme désigne finalement l'état de santé des équipages exposés à de l'air réputé contaminé¹⁻³. Ce terme reste médicalement controversé car il associe les symptômes observés avec l'exposition aux fumées provenant des huiles des moteurs et des fluides hydrauliques, sans que des preuves scientifiques aient pu clairement établir la causalité de ce lien¹. Cependant, il est communément utilisé pour désigner l'exposition des personnels navigants et des passagers à un air possiblement contaminé par des composés toxiques. De manière très résumée, les symptômes développés peuvent être aigus ou chroniques : irritation, sensibilisation, neurotoxicité comme maux de tête, confusion, perte d'équilibre, faiblesse musculaire et problèmes neurocomportementaux⁴. Parmi ces symptômes, certains sont très lentement, voire non réversibles.

Le premier cas rapporté dans la littérature est celui d'un pilote de C-130 Hercules devenu handicapé en 1977 après l'inhalation d'air contaminé. Les suspicions se sont rapidement dirigées vers les composés organophosphorés contenus dans l'huile des moteurs, dont les propriétés neurotoxiques sont connues depuis avant la seconde Guerre Mondiale³. Nous pouvons citer en premier lieu le Tricresyl-Phosphate (TCP) et en particulier son isomère le tri-ortho-cresylphosphate (ToCP), suscitant de nombreuses recherches scientifiques. Ses effets neurotoxiques marqués (ataxie, paralysie flasque des extrémités, dégénérescence rétrograde des axones des nerfs périphériques, axonopathie distale avec paralysie des membres supérieurs puis antérieurs, paresthésie) ont été particulièrement mis en évidence dans l'affaire du « Ginger Jake ». Le Ginger Jake était un élixir alcoolisé frelaté avec du TCP, prescrit contre le choléra, la dyspepsie et les nausées, répandu aux USA pendant la prohibition : il semble avoir provoqué l'intoxication en 1930 de plusieurs dizaines de milliers de personnes⁵. Plus récemment dans la courte histoire du syndrome aérotoxique, on note la mort soudaine d'un pilote en 2014 souffrant depuis un an de problèmes neurologiques sérieux. Les investigations post-mortem ont révélé des dommages neurologiques étendus, associés par

certaines scientifiques ayant participé à l'autopsie de ce pilote, à l'exposition aux organophosphorés⁶. Le problème demeure donc d'actualité comme le montrent les récentes études scientifiques réalisées dans ce domaine. La publication en 2015 par l'International Civil Aviation Organisation (ICAO) d'une norme relative à la formation et à l'entraînement des personnels en cas de « fume event » (contact avec de l'air contaminé), illustre le caractère toujours actif de la préoccupation entourant le syndrome aérotoxique⁷.

2. Origine des polluants dans les cabines d'avion

Les campagnes de mesures montrent une variété considérable dans les polluants mesurés dans l'air, au point qu'il est parfois difficile de les associer à une source précise. Cependant, il est possible de dégager les sources majeures pouvant entraîner une pollution de l'air. La plus régulièrement citée est le « bleed air », circulant dans la cabine. Nous verrons ci-après comment le système d'approvisionnement permet de telles contaminations. Une autre source est la cabine de l'avion en elle-même par les matériaux présents ou les produits d'entretien et cosmétiques utilisés à l'intérieur. Enfin, les passagers et membres d'équipage eux-mêmes sont sources de polluants par leur métabolisme et leurs activités.

2.1. Approvisionnement de la cabine en air : le « bleed air »

La pressurisation d'un avion est nécessaire pour permettre le transport confortable de passagers¹. L'« environmental control system » (ECS) joue ce rôle de pressuriser et ventiler la cabine, de contrôler l'environnement thermique adapté à l'occupation humaine et de contrôler les concentrations de contaminants à des niveaux acceptables. Le débit d'air entrant recommandé par l'Agence européenne de sécurité aérienne (EASA)⁸ est de 0,28 m³/min/personne soit presque 17 m³/h/personne. Ainsi pour un avion de 200 passagers, ce débit s'élève-t-il à 3360 m³/h. Le renouvellement de l'air total est supérieur à 20 fois par heure⁹, ce qui représente un taux de renouvellement très supérieur à celui constaté dans les logements ou autres environnements fermés au sol. La réglementation impose une pression dans la cabine entre 75 et 81 kPa^{1, 10} contre une pression atmosphérique normale de 100 kPa environ. La source utilisée pour la pressurisation et la ventilation de la plupart des avions est de l'air de prélèvement ou « bleed air », pris au niveau des compresseurs des moteurs de l'avion afin qu'il soit à une température supérieure à celle régnant autour de l'avion (de l'ordre de -50°C) et pressurisé. Pour cela, l'air extérieur est conduit dans l'unité d'air conditionné (Figure 1), où se déroulent des étapes de compression et de refroidissement¹¹. Il entre ensuite dans une unité de mélange appelée « mix manifold » ou « air mixing unit ». Il y est mélangé avec une quantité égale d'air recyclé avant d'entrer dans la cabine. Le système de recyclage est équipé de « High Efficiency Particulate Air » (HEPA), qui enlèvent la poussière et autres particules fines comme les bactéries et les virus^{1,12}. Ces filtres n'enlèvent ni les gaz ni les vapeurs en raison de leur petite taille moléculaire¹.

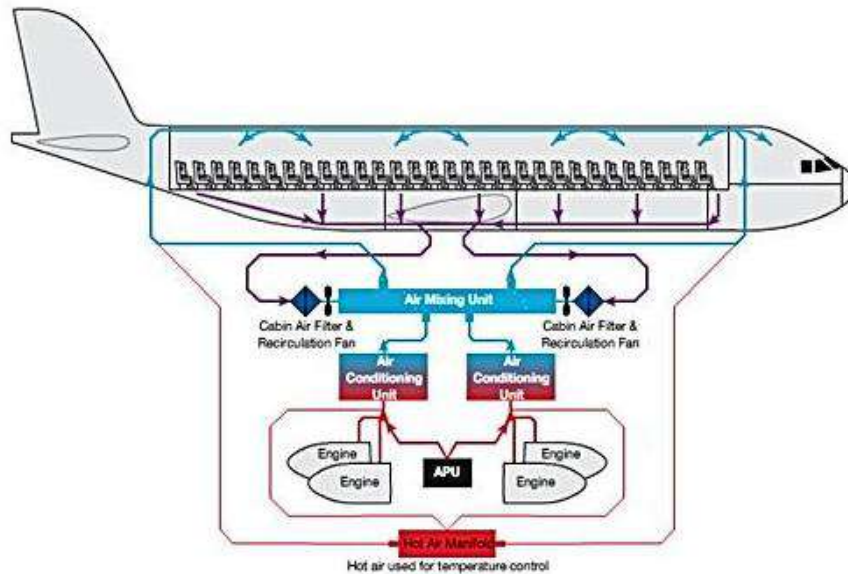


Figure 1- Vue d'ensemble du système de ventilation d'un avion (d'après Hildre et Jensen¹)

Par ailleurs, le cockpit reçoit continuellement de l'air de prélèvement alors que dans la cabine 40 à 60 % de l'air provient du recyclage. Les pilotes sont donc plus exposés durant les « fume events » aux composés issus des huiles ou des fluides hydrauliques¹ pouvant se trouver dans l'air moteur prélevé.

Lorsque l'avion est au sol ou lorsque le maximum de puissance est demandé aux moteurs (décollage ou atterrissage), l'« Auxilliary Power Unit » (APU) est généralement utilisée. Il s'agit d'une petite turbine, typiquement située à l'arrière de l'appareil, utilisant un produit pétrolier et fournissant de l'énergie électrique et de l'air chaud comprimé lorsque les moteurs ne sont pas opérationnels¹⁰. Cet air alimente aussi les packs d'air conditionné.

Pour comprendre comment les contaminations du « bleed air » peuvent se produire, penchons-nous sur le lieu de son prélèvement, c'est à dire au niveau des moteurs. De façon très simplifiée et comme indiqué sur le schéma ci-dessous (Figure 2), un moteur est composé successivement d'un compresseur (compressor), d'une chambre de combustion (burner) et d'une turbine (turbine)^{1, 13}.

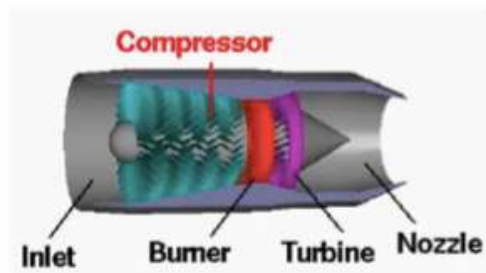


Figure 2- Vue schématique d'une section de moteur (d'après Hildre et Jensen¹)

Le flux d'air entrant de l'extérieur dans le moteur va soit autour de celui-ci (« bypass air ») ou bien dans le cœur du moteur où il est comprimé (Figure 3). Celui-ci entre ensuite dans la chambre de combustion (combustion section) où le kérosène est ajouté. L'énergie chimique du carburant est alors convertie en énergie thermique. Puis cette dernière est convertie en énergie mécanique par entraînement de la turbine.

Une partie de l'air comprimé (2-8% généralement) est prélevée à différents endroits (généralement deux points de prélèvement) selon le constructeur du moteur et correspond au « bleed air ». La sélection du point de prélèvement est contrôlée automatiquement pour maintenir l'air à la pression appropriée¹⁴. Celui-ci est ensuite utilisé pour alimenter l'ECS décrit ci-avant et ainsi l'amener à des conditions physiologiques confortables.

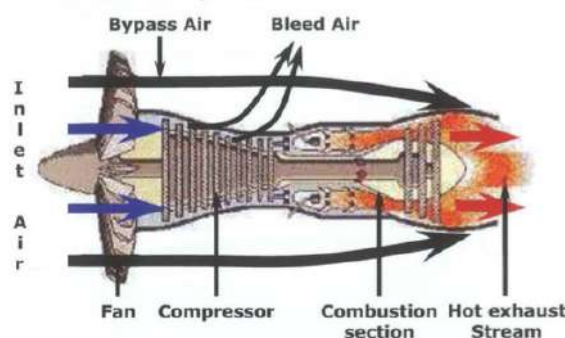


Figure 3- Schéma du flux du "bleed air" dans le système de prélèvement d'un avion (d'après Winder¹³)

Ce descriptif nous permet de mieux comprendre l'origine des « fume events ». En passant dans le moteur, l'air peut être contaminé en cas de fuite d'huile, utilisée pour la lubrification et le refroidissement des moteurs, pouvant entraîner des risques de combustion/pyrolyse et de formation de produits secondaires arrivant dans la cabine. Des systèmes de sécurité avec des valves permettent de couper l'arrivée d'air en cas de situations dangereuses comme un excès de chaleur, des fuites ou des feux. Malgré ce système, des expositions aiguës à des toxiques

surviennent encore. A côté de ces situations d'urgences, d'autres situations courantes peuvent aussi entraîner une faible contamination quasi-continue de l'air par des substances présentes dans le moteur (micro-fuites par exemple).

2.2. Principales sources de pollution

Lors de la revue bibliographique visant à identifier les origines des polluants retrouvés dans la cabine, nous avons identifié six sources majeures : les contaminations liées au « bleed air » et aux moteurs, aux matériaux de l'avion, aux produits d'entretien et cosmétiques utilisés dans l'avion, à la présence humaine, à l'alimentation, et enfin aux biocides.

○ Polluants liés au « bleed air » et aux moteurs^{1,8,10,11,13,15-28} :

Comme nous l'avons décrit ci-dessus, c'est la source la plus rapportée de contamination. Cette catégorie englobe tous les produits utilisés pour le bon fonctionnement du moteur et pouvant, lors d'un dysfonctionnement, passer dans l'ECS (Figure 4). Sont retrouvés entre autres des polluants issus du kérosène et carburants, des huiles moteurs, des fluides hydrauliques (et/ou leurs additifs), des fluides caloporteurs, des lubrifiants, des liquides de refroidissement, des produits antigel ou encore des produits et sous-produits des réactions de combustion, complètes ou non. De plus, le « bleed air » peut être pollué par des sources extérieures, au niveau où l'air est prélevé. Ceci est plus particulièrement vrai au sol, lors du stationnement de l'avion sur la piste ou dans les hangars. Par exemple, la contamination par des gaz d'échappement de véhicules stationnés, et des avions voisins décollant ou atterrissant, à proximité des prises d'air peut avoir lieu.

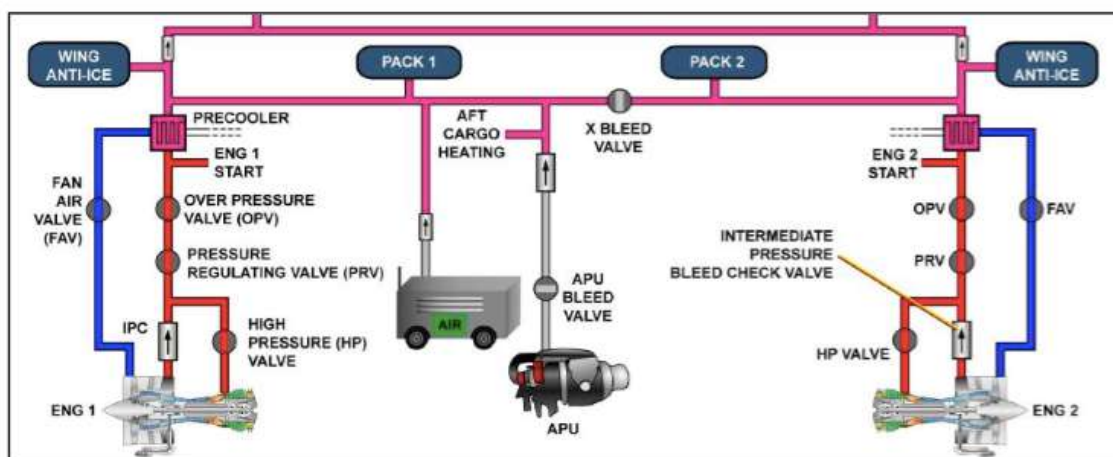


Figure 4- Schéma du système pneumatique (Airbus A320) (d'après Air Accident Investigation Unit Ireland²⁵)

○ Polluants liés aux matériaux de l'avion^{10,11,13,15,16,21,23,24,26,28,29} :

Les matériaux utilisés dans la construction de l'avion peuvent aussi être source d'émissions toxiques, en particulier lorsqu'ils contiennent des additifs (retardeurs de flamme par exemple) pour répondre aux normes de sécurité en vigueur. De nombreux mobiliers, matériels et matières peuvent être concernés : résines acryliques et vinyliques, caoutchouc et sols en caoutchouc vinylique, plastiques et plastifiants, stratifiés en plastique, polychlorure de vinyle (PVC), linoleum, pâtes à bois et finitions en bois, bois aggloméré, peintures, calfeutrages et mousses d'isolation, panneaux de fibres ou de particules, adhésifs pour tapis, colles, carreaux de plafond, intérieur de cabine, vernis des sols, tapis et moquettes, sous-tapis, sièges, mobiliers avec fini laqué ou encore extincteurs d'incendie.

○ Polluants liés aux produits d'entretien et aux cosmétiques utilisés^{10,11,13,15-17,23,24} :

Un certain nombre de produits d'entretien sont susceptibles d'être utilisés à bord d'un avion, pour son maintien en condition ou pour l'usage personnel des passagers. Pour l'entretien sont retrouvés les produits de nettoyage, les agents de nettoyage à sec, les détergents domestiques, les décapants, certains solvants comme le white spirit, les solvants dégraissants, les désodorisants, les désinfectants, les sous-produits après ajout de chlore dans l'eau, les produits pour le traitement des textiles ou encore les imperméabilisants. Pour les passagers peuvent être retrouvés des contaminants issus des démaquillants, des cosmétiques, de la laque, des vernis et dissolvants, des médicaments, des déodorants ou encore des parfums.

○ Polluants liés à l'homme^{10,11,15,17,23,24,27,29-31} :

Dans cette catégorie figurent tous les bioeffluents, les métabolites humains importants ou mineurs, notamment dans l'air expiré. Dans le cas des cabines d'avion au sein desquelles la concentration en ozone est importante (absence de convertisseur), on trouve également des produits de réaction de l'ozone avec les lipides de la peau (squalène, acides gras, cholestérol, vitamines E et A, ubiquinone, lycopène, acide ascorbique, glutathion, acide urique, β -carotène...) ³⁰.

○ Polluants liés à l'alimentation^{10,13,15-17,23,24} :

La nourriture, les boissons, notamment alcoolisées ou aromatisées et la carboglace peuvent contaminer l'air de la cabine.

○ Polluants liés aux biocides^{17,20,30,32-34} :

Dans le respect des normes internationales et pour éviter la transmission de maladies par différents vecteurs comme les insectes, il est régulièrement effectué lors des vols

internationaux des traitements de l'avion par des insecticides. Ces derniers contiennent des molécules biocides plus ou moins rémanentes pouvant alors contaminer l'air ambiant.

Les origines des divers contaminants sont regroupées dans les tableaux consultables en annexe (Annexe 1). Le classement dans les six catégories décrites ci-avant découle logiquement de la liste des sources issue de la bibliographie.

Une étude¹⁵ s'est intéressée à la proportion massique des différentes sources, uniquement pour la famille des composés organiques volatils retrouvés dans la cabine. Les résultats de cette analyse sont résumés dans la Figure 5.

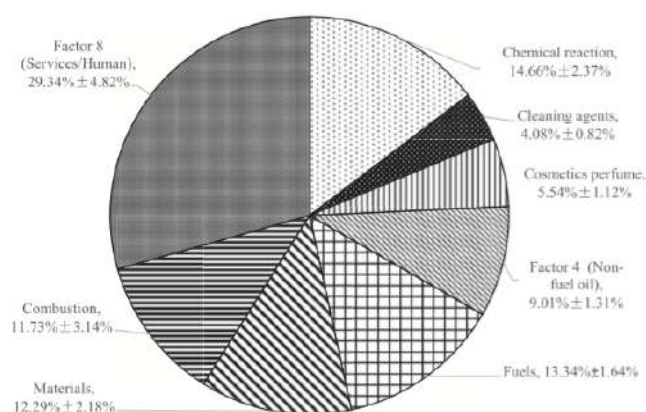


Figure 5- Contributions en masse de différentes sources aux composés volatils organiques totaux dans l'air de cabine
(d'après Wang et al.¹⁵)

Nous pouvons retrouver globalement les différentes catégories identifiées : les contaminations du « bleed air » sont divisées en combustion, carburant, huiles et réactions chimiques. Elles représentent bien la source majeure de contamination : environ 50% au total. Les contaminations liées à l'homme et celles liées à l'alimentation sont regroupées en une seule catégorie. Elles sont loin d'être négligeables car elles représentent presque 30% en moyenne pendant toute la durée du vol. Viennent ensuite les contaminations liées aux matériels qui s'élèvent à 12% environ. Les contaminations par les produits utilisés sont divisées en agents de nettoyage et parfums de cosmétiques. L'ensemble s'élève à 10% environ.

En ce qui concerne la revue bibliographique effectuée par nos soins, le poids de chacune des origines est plus difficile à établir car de nombreux polluants sont retrouvés dans plusieurs sources. Sur les 95 polluants de sources identifiées, il ressort l'analyse des sources suivante (Figure 6).

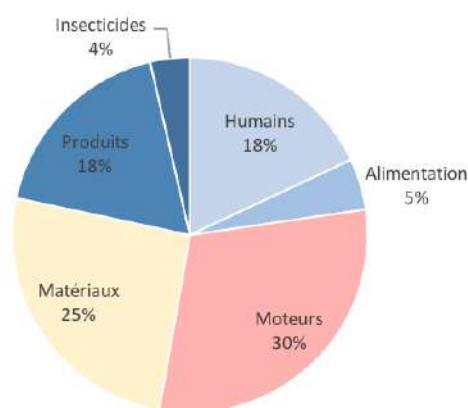


Figure 6- Contributions des différentes sources de contaminations de l'air de cabine

Avant toute interprétation, il est nécessaire de noter que l'étude précédente se distingue de notre synthèse en n'analysant que les composés organiques volatils (COV) et non la totalité des polluants. Elle utilise de plus des pourcentages massiques alors que notre approche, uniquement qualitative, fournit un pourcentage en nombre de composés par source. Les proportions mises en évidence peuvent donc différer. A l'inverse, notre synthèse peut souffrir des biais de publication habituels avec par exemple des phénomènes de « mode ». Néanmoins, nous pouvons constater que les contaminations liées au « bleed air » (carburants, fluides hydrauliques et huiles de façon simplifiée) occupent toujours la première place. Aucune hiérarchie ne semble se dessiner entre les matériaux (25%), les activités humaines et l'alimentation (23%) et les produits utilisés dont les insecticides (22%).

Cette analyse illustre l'extrême difficulté pour confirmer de manière non ambiguë l'origine du syndrome aérotoxique. Les polluants sont nombreux, de sources diverses et d'importances variables, l'environnement intérieur des cabines d'avion est particulier et sa population, notamment professionnelle, y est exposée à de nombreux dangers (radiations ionisantes en altitude, horaires décalés, fréquentation de pays tropicaux avec maladies endémiques non existantes dans le pays d'origine etc.). Il est donc impossible de relier des contaminants précis aux effets de santé sur la base de simples études observationnelles car nous ne pouvons négliger de potentielles interactions, facteurs de confusion, synergies ou additions.

3. Occurrence des « fume events »

Une revue de la littérature ne permet pas d'affirmer une occurrence certaine des « fume events ». Leur recensement est en effet confronté à plusieurs difficultés présentées ci-après.

○ Caractérisation d'un « fume event » : il n'existe pour l'instant aucune définition admise du « fume event ». Cependant, il est généralement associé à une odeur de chaussettes sales ou de chien mouillé, perceptible par l'équipage et les passagers et décrite comme inhabituelle en durée et/ou intensité. Une fumée peut même être visible dans les cas les plus sévères (Figure 7). Ces caractéristiques sont notamment confirmées par une étude³⁵ : l'auteur évoque des odeurs inhabituelles de pieds malodorants et de chaussette sales dans 40,2% des cas. Plus récemment, un autre travail³⁶ associe aux « fume events » les odeurs de brûlé, d'huiles, de fumées, de produits chimiques, de cuisine industrielle, de gymnase ou encore de vomi. La non-existence d'une définition claire d'un « fume event » et la perception différente des événements par le personnel navigant ne facilite pas leur identification équivoque et plus tard leur déclaration. Peu de questionnaires actuellement mis en place dans les études se penchent sur les caractéristiques de l'événement. Une publication³⁷ montre un questionnaire global où sont retrouvées quelques questions relatives au « fume event », en terme d'aspect (fumée/odeur), d'intensité (croissante/décroissante) ou de caractéristiques (couleur/ altération de la visibilité). La grille utilisée est consultable en annexe (Annexe 2). Actuellement, cette détection est uniquement olfactive et/ou visuelle.



Figure 7- « Fume event » sévère avec fumées visibles (d'après www.aerotoxic.org)

○ Sous-déclaration des « fume events » : peu de données sont réellement disponibles, aussi bien auprès des industries aéronautiques que des compagnies de transport. Les chiffres dessinent une tendance mais l'étendue du phénomène reste encore inconnue. Une thèse autour de l'air contaminé³⁸ avance que seuls 4% des « fume events » seraient reportés. En effet, ces odeurs et fumées intermittentes sont considérées comme « normales » par l'équipage, et le sont peut-être parfois (donc ne traduiraient pas un dysfonctionnement matériel). Diverses études^{35, 39} confirment cette sous-déclaration. Elles affirment par ailleurs que la peur de perdre son travail, pour inaptitude médicale notamment, limite les rapports de « fume events », en particulier si les signalements des membres d'équipage ne concordent pas. D'autres explications à cette sous-déclaration sont évoquées dans une seconde thèse sur le syndrome aérotoxique¹³. L'équipage, non sensibilisé aux « fume events », éprouve souvent un découragement face au rapport écrit à fournir et face aux affaires déclarées puis classées sans suite après investigation. Les pressions commerciales peuvent être aggravées par la peur de passer pour un faiseur de trouble en cas de rapports trop fréquents, s'il s'agit d'un avion défectueux (les coûts d'immobilisation pour maintenance non programmée représentant une perte d'exploitation importante) et par la culture de minimisation des risques sanitaires. Les risques chimiques en particulier demeurent méconnus et leur potentielle gravité en est donc parfois ignorée. En outre, il n'existe à ce jour pas de voies de déclaration pour les passagers. Les recherches menées jusqu'alors concernent et interrogent quasi-exclusivement les membres d'équipage.

○ Facteurs d'influence : la troisième difficulté à la juste comptabilisation des « fume events » est l'influence de différents paramètres. L'apparition d'un « fume event » est d'abord influencée par la phase de vol. Certains auteurs⁴⁰ indiquent que la majeure partie des événements (68%) a lieu pendant le vol et plus spécifiquement pendant la phase d'ascension (48%) ou de descente (26%). Un manque de reproductibilité est mis en évidence par une autre étude¹⁶ évoquant une odeur surtout perçue avant le décollage (50,6%). Le UK Committee on Toxicity (COT) met en évidence une influence du type de moteur, des pratiques de maintenance et du type d'avion. D'autres auteurs³⁶ enfin définissent un indice composite à partir du nombre d'incidents par avion, du nombre d'incidents par vol et du nombre d'incidents par heure de vol (Figure 8).

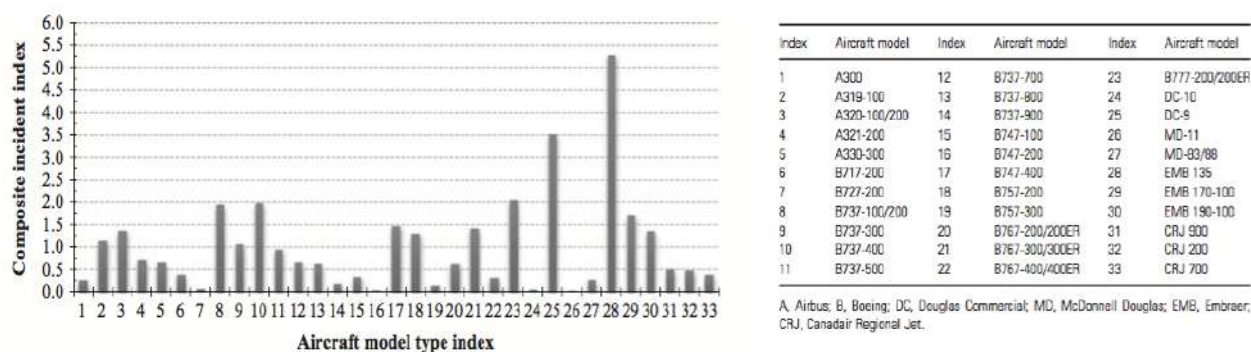


Figure 8- Indice composite pour le taux d'incident en fonction du modèle d'avion (d'après Shehadi et al.³⁶)

Les avions avec les taux d'incidents les plus importants sont variés en terme de fabricant et de modèle, c'est pourquoi aucune relation claire entre un facteur (type d'avion, modèle d'APU, type de moteur, constructeur) et la fréquence de « fume event » ne peut être établie. Cependant certains avions ont une fréquence d'incidents plus élevée, jusqu'à 5 fois la moyenne. Le numéro 28 correspond à l'EMB 135 (Embraer) et le 25 au DC-9 (Douglas Commercial). Les différents facteurs d'influence évoqués ci-avant rendent donc plus difficile les études sur la fréquence de tels événements.

Malgré ces problèmes de caractérisation, plusieurs travaux permettent de fournir une idée de la fréquence des « fume events ». La fréquence minimale est avancée par le US-National Research Council (US-NRC)⁸ avec 0,09 à 3,9 événements pour 1 000 vols. Cela concernerait donc au minimum 2 à 3 vols par jour aux USA. Un autre travail³⁶ parle de 0,2 événements en moyenne pour 1 000 vols aux USA avec une fréquence maximale de 0,8 pour un type d'avion. Le UK Committee on Toxicity évoque ensuite 0,5 à 10 événements pour 1 000 vols d'après une étude réalisée auprès de 3 compagnies. D'autres auteurs⁴⁰ recensent à leur tour 0,86 événement par jour aux USA lors de la période évaluée. Enfin une autre publication fait état de 1 à 3,8 cas pour 1 000 vols, selon le type d'avion et de maintenance³⁹.

Ces chiffres illustrent bien que les « fume events » ne relèvent pas d'un problème anecdotique malgré les difficultés de sous-déclaration.

4. Dangers des polluants identifiés dans les cabines d'avion

Les éventuels « fume events » exposent les passagers à des polluants nombreux. Les scientifiques se sont particulièrement intéressés aux organophosphorés en raison de leur potentielle toxicité. Parallèlement, les dangers liés aux biocides et autres produits d'entretien utilisés ont été évoqués. Plus largement, les potentiels symptômes ou changements métaboliques entraînés par l'environnement aéronautique ont aussi été discutés.

4.1. Etude des dangers des organophosphorés ^{1,41-49}

La structure générale des organophosphorés est constituée d'un atome de phosphate, un atome d'oxygène et trois substituants organiques (Figure 9).

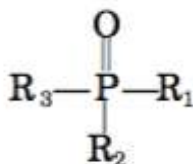


Figure 9- Structure générale des organophosphorés (R_1 , R_2 , R_3 : substituants organiques)

Leur toxicité a été étudiée très tôt comme en attestent les travaux des scientifiques anglais W.N. Aldridge et J.M. Barnes (1953 et 1961)^{41,44} et ceux de leurs homologues allemands D. Henschler et H.H. Bayer (1958 et 1959)^{46,47}. L'activité inhibitrice du ToCP et plus particulièrement de son métabolite, sur les cholinestérases, est établie. Une démyélinisation est aussi constatée et un lien pourrait exister⁴⁴. L'étude plus détaillée de l'action neurotoxique sur des poulets (méthode de référence pour objectiver la neuropathie retardée induite par les organophosphorés (OPIDN)) montre une ataxie jusqu'à l'incapacité de tenir debout et une perte de poids. Est aussi constatée chez l'Homme et certains animaux une paralysie irréversible par démyélinisation des nerfs périphériques et de certaines voies de la moelle épinière⁴⁷. Après ce préambule historique, de nombreux travaux plus récents^{1,43,45,48,49} ont dressé un portrait détaillé des effets des organophosphorés et plus spécifiquement du TCP sur l'organisme humain. La figure suivante montre une vue d'ensemble des différentes actions des organophosphorés anticholinestérasiques (Figure 10)¹.

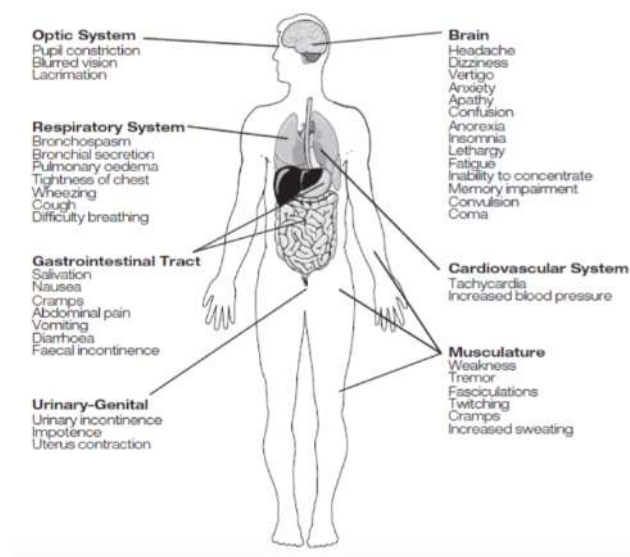


Figure 10- Conséquences d'un empoisonnement par les organophosphorés (d'après Hildre et Jensen¹)

Les effets neurotoxiques du TCP sont divisés en quatre classes^{1,49} : empoisonnement (aigu) par les organophosphorés, neuropathie retardée induite par les organophosphorés, syndrome intermédiaire et trouble neuropsychologique chronique induit par les organophosphorés.

- **EMPOISONNEMENT AVEC LES ORGANOPHOSPHORÉS** : comme vu précédemment, la toxicité des organophosphorés est principalement due à l'inhibition des estérases, plus particulièrement des cholinestérases (AChE) et estérases neurotoxiques (NTE). Les NTE sont des protéines membranaires impliquées dans la voie de signalisation cellulaire contrôlant les interactions entre les neurones et les cellules gliales pour le développement du système nerveux. Les AChE décomposent les esters de choline endogènes et leur inhibition produit alors l'accumulation d'acétylcholine, un neurotransmetteur du système cholinergique. Les tissus ou organes recevant un influx cholinergique deviennent alors plus actifs et excités. C'est cette sur-stimulation cholinergique qui produit la majeure partie des symptômes d'un empoisonnement par exposition à court terme aux organophosphorés. Les signes d'une faible intoxication incluent maux de tête, vertiges, faiblesse générale, somnolence, léthargie, difficulté de concentration, trouble de l'élocution, confusion, labilité émotionnelle et hypothermie. Ils sont souvent précédés de symptômes précoces associés au surplus d'acétylcholine : salivation, conjonctivite, troubles visuels, nausées et vomissements, douleurs abdominales et crampes, diarrhées, effets parasymphomimétiques sur le cœur et la circulation, fasciculations et contractions musculaires.

- NEUROPATHIE RETARDÉE INDUITE PAR LES ORGANOPHOSPHORÉS (OPIDN) : le processus pourrait débuter par la phosphorylation d'un groupe d'estérases appelées les neurotoxiques estérases, entraînant la modification de celles-ci. Elles ne peuvent donc plus assurer leur fonction, en particulier le long des axones où elles contribuent au transport des nutriments et des molécules énergétiques du corps de la cellule jusqu'aux terminaisons nerveuses. En cas d'exposition continue, cela entraîne la phosphorylation de davantage de protéines, induisant la dégénération progressive des axones, de la myéline et des cellules environnantes. L'inhibition de 50% des enzymes suffirait à produire une toxicité. Initialement, elle se présente comme une neuropathie symétrique distale sensori-motrice affectant principalement les membres inférieurs avec sensations de picotements et de brûlure, engourdissement et faiblesse. Dans les cas les plus sévères, une paralysie peut apparaître. Pour mieux comprendre le mécanisme d'action au niveau cérébral, le TCP a été testé in vitro sur des cultures de cellules cérébrales⁴². Alors que les isomères du TCP n'influencent pas la viabilité des cellules, le 2-(ortho-cresyl)-4*H*-1,3,2-benzodioxaphosphoran-2-one (CBDP), métabolite du ToCP, réduit considérablement celle-ci. Cela s'explique par l'effet inhibiteur des estérases intracellulaires. En ce qui concerne l'activité neuronale, elle n'est réduite qu'après une exposition de 48 h à de fortes doses de CBDP, ToCP ou de mélange. Aucune influence particulière sur la croissance des cellules n'est à noter.

- SYNDROME INTERMÉDIAIRE : la neuropathie retardée induite par les organophosphorés (OPIDN) est sévère et il semble qu'elle soit précédée par une gamme de symptômes cliniques et précliniques. Les symptômes de ce syndrome intermédiaire incluent la paralysie des membres proximaux, la faiblesse des muscles du cou, l'inhibition des muscles respiratoires et l'atteinte des nerfs crâniens⁴⁹.

- NEUROPATHIE CHRONIQUE INDUITE PAR LES ORGANOPHOSPHORÉS (COPIDN) : elle est associée à une exposition chronique et induit des symptômes neurologiques et des effets neuropsychologiques. Sont relevés une concentration réduite et une vigilance affaiblie, une mémoire déficiente et des troubles du langage, un ralentissement dans le traitement d'informations et la vitesse psychomotrice et des symptômes diffus neuropsychologiques avec maux de tête, fatigue mentale, dépression, anxiété et irritabilité. Ces symptômes sont notamment retrouvés chez des individus exposés à court terme ou de façon unique ou encore de façon répétée à long terme et à un faible niveau^{1,49}.

4.2. Etude des dangers d'autres molécules

A côté des organophosphorés, d'autres molécules peuvent être retrouvées dans l'air contaminé et entraîner des effets sanitaires^{20,50,51}.

- **Les insecticides** sont une source de contamination de l'air (et des surfaces) non négligeable. Ils sont utilisés pour le contrôle des insectes et pour se conformer aux exigences du règlement sanitaire international⁵¹. Les effets globalement rapportés sont une irritation des voies respiratoires, une respiration courte et sifflante, des rashes cutanés, des maux de tête, une irritabilité, une neuropathie, des vertiges, une ataxie, une confusion, une faiblesse générale et une transpiration marquée^{30,50}.

- **Les fluides dégivrants** sont aussi potentiellement retrouvés dans l'air des avions pendant les opérations au sol. Contenant du propylène glycol, du diéthylène glycol ou du méthylène glycol, ils peuvent entraîner irritation respiratoire et maux de tête.

- **Les désinfectants et désodorisants** utilisés dans la cabine contiennent aussi des ingrédients actifs ou additifs pouvant engendrer irritation respiratoire et sensibilisation cutanée ou respiratoire.

4.3. Effets d'autres caractéristiques physicochimiques des cabines d'avion

La particularité de l'environnement dans un avion en vol peut à elle seule engendrer des effets de santé. Nous décrirons successivement l'effet de l'humidité relative⁵², celui de la faible pression atmosphérique⁵³ entraînant une faible pression partielle en oxygène (O_2)^{49,51} et enfin celui de la concentration en ozone (O_3) potentiellement élevée⁵¹.

- Selon l'Académie nationale des sciences des États-Unis, l'**humidité relative** dans une cabine d'avion est comprise entre moins de 2% et 23 %. D'une manière générale, un taux d'humidité confortable est considéré entre 30 et 70 %. Associés à cette faible hygrométrie sont relevés une irritation et une sécheresse de la peau et des muqueuses (nez, gorge), de la bouche et du pharynx, des symptômes oculaires, une congestion ou au contraire un écoulement nasal, des éternuements, des symptômes asthmatiformes (toux, faiblesse respiratoire) et des symptômes plus généraux comme de la fatigue et des maux de tête.

- Une étude⁵³ menée dans un environnement à **basse pression** montre la diminution du débit respiratoire (L/min) en même temps que la diminution de la pression. Comme la *proportion* en O_2 dans l'air reste inchangée, en cas de pression inférieure à celle atmosphérique, il y a une diminution de la *quantité* d' O_2 dans l'air, à volume respiratoire constant. Selon la pression

partielle, certains symptômes peuvent apparaître : vertiges, maux de tête, évanouissements, plaintes cardio-pulmonaires, possible augmentation du risque de thrombose veineuse profonde. De plus, le faible niveau d'oxygène pourrait entraîner des changements dans la sensibilité lors de l'exposition à certains toxiques. Des auteurs confirment l'effet des vols commerciaux en altitude sur la saturation en O_2 ⁵⁴. Les résultats de cette étude montrent que 50 % des passagers ont une saturation en O_2 inférieure ou égale à 94% à l'altitude de croisière, pour des valeurs normales comprises entre 96 et 100%. D'autres travaux sur des personnes atteintes de bronchopneumopathie chronique obstructive (BPCO) révèlent que ces derniers ont un risque de dyspnée et de manque d'air multiplié par 6,6 par rapport à des sujets non-atteints⁵⁵.

- Enfin, le niveau d' O_3 augmente avec l'altitude et varie selon la saison⁵⁶. Des échantillonnages dans des avions équipés de convertisseurs reportent des concentrations d' O_3 de moins de 100 à 480 $\mu g/m^3$. L'OMS recommande une exposition maximale de 100 $\mu g/m^3$ sur une période de 8 heures. Ce niveau d' O_3 dans les cabines peut entraîner une oppression thoracique, une respiration sifflante ou une toux.

5. Effets de santé rapportés par les équipages

5.1. Qualitativement^{4,20,28,51,57-66}

Nombreux sont les effets de santé rapportés par les équipages après une exposition à l'air contaminé. Nous pouvons classer ces effets en différentes catégories après une recherche bibliographique réalisée sur 24 études recensées dans 13 sources (Annexe 3).

La plupart des symptômes est ressentie au moment même de l'exposition, il s'agit de symptômes aigus. Des atteintes respiratoires, neurologiques, systémiques, psychiatriques et dermatologiques sont rapportées.

- Effets respiratoires : la toux, les difficultés respiratoires avec une respiration souvent courte, sifflante et une sensation d'oppression thoracique pouvant être accompagnée de douleurs dans la poitrine, l'irritation des muqueuses, en particulier des yeux, du nez et de la gorge sont les principaux symptômes reportés. Une ressemblance avec les symptômes grippaux est parfois notée avec par exemple une congestion nasale.
- Effets neurologiques : ils sont les plus variés. A côté des maux de têtes pouvant être sévères, sont également reportés les vertiges et étourdissements, les troubles de vision, les tremblements, les paresthésies ou les fourmillements dans les membres, les problèmes d'équilibre et de démarche, le manque de coordination, la désorientation ou encore les problèmes de vision. Au niveau cognitif, nous pouvons également relever des effets sur le système nerveux central (SNC) avec des problèmes de mémoire, d'élocution, de concentration, de confusion, une réflexion mentale ralentie avec un temps de réponse allongé et une difficulté d'effectuer plusieurs tâches. Une évaluation cognitive plus poussée, réalisée sur 27 pilotes après exposition à de l'air contaminé, permet d'objectiver certains de ces symptômes⁶⁰.
- Effets systémiques : la fatigue voire l'épuisement ou la léthargie sont prépondérants. Ils sont accompagnés de faiblesse et douleurs musculaires et articulaires. Au niveau de la sphère digestive, sont constatés des nausées et vomissements, ainsi que des diarrhées. Un goût métallique dans la bouche peut aussi être noté. Une salivation excessive peut également être constatée⁶⁰. Les personnels navigants signalent aussi des problèmes cardio-vasculaires comme des palpitations ou une fréquence cardiaque augmentée.

- Effets psychiatriques : les personnels témoignent d'anxiété, de dépression, de problème de sommeil et également de stress post-traumatique.
- Effets dermatologiques : des rashes et des irritations sont les principales manifestations cutanées aiguës.

Il convient de noter que ces symptômes aigus ne sont pas décrits par les seuls membres d'équipage d'aéronefs. En effet, de nombreux effets de santé, principalement les moins graves, sont également rapportés par les personnes exposées à de l'air intérieur, dans les logements ou transports par exemple, à l'exception des symptômes de la sphère neurologique⁶¹. Ceci explique l'attention particulière portée dans la littérature scientifique aux molécules neurotoxiques potentiellement présentes lors des « fume events ».

Les effets sanitaires rapportés ne se limitent pas à des effets aigus. Certains effets deviendraient chroniques⁶⁰.

- Effets respiratoires : en plus des effets notés ci-dessus, les personnels navigants seraient plus sujets aux maladies respiratoires comme les bronchites chroniques, les problèmes de sinus, les emphysèmes ou bien les BPCO.
- Effets neurologiques : identiques aux effets aigus.
- Effets systémiques : en plus des effets notés ci-dessus, on relève des signes d'immunosuppression avec une sensibilité chimique augmentée ainsi que des allergies. Par ailleurs, une incidence supérieure à la population normale a été mesurée pour les cancers reproductifs chez la femme (sein, utérus, ovaire).
- Effets psychiatriques : identiques aux effets aigus.
- Effets dermatologiques : en plus des effets notés ci-dessus, on note des pertes de cheveux chroniques. Une incidence augmentée de cancer de la peau est également notée.

5.2. Fréquence

La fréquence des différents symptômes varie selon les études réalisées. Pour obtenir une estimation générale, nous avons réalisé une moyenne des chiffres mentionnés pour chaque catégorie d'effets de santé. Ces variations sont notamment explicables par les sensibilités individuelles différentes, le type et la durée d'exposition, la subjectivité dans les symptômes perçus. Les fréquences ci-dessous sont issues de la synthèse des articles identifiés^{1,59-61,63}.

- Effets respiratoires : retrouvés chez 26% des personnels environ. 40% des membres d'équipage souffrent de problèmes d'irritation des yeux, du nez et de la gorge, 15,5% de respiration courte et 4% de toux.
- Effets neurologiques : retrouvés chez 43% des personnels environ. 72% des membres d'équipage souffrent de vertiges et désorientation, 62% de ralentissement de la réflexion mentale, 47% de problème de mémoire, 38% de maux de tête, 35% de problèmes d'équilibre, 17% de paresthésie et d'engourdissement et 8% de difficultés de concentration.
- Effets systémiques : retrouvés chez 53% des personnels environ. 41% des membres d'équipage souffrent de fatigue, épuisement ou léthargie, 39% de sensibilité chimique exacerbée et d'allergies, 33% de dysarthrie, 25% de problèmes cardio-vasculaires dont palpitations, 24% de faiblesses et douleurs musculaires, 23% de nausées et vomissements, 10% de diarrhées.
- Effets psychiatriques : retrouvés chez 39% des personnels environ. 36% des membres d'équipage souffrent de dépression, 33% de problèmes de sommeil et 20% d'anxiété.
- Effets dermatologiques : 17% des membres d'équipage souffrent de pertes de cheveux et 11% de rash et d'irritation cutanée.

5.3. Association entre effets de santé et qualité de l'air

5.3.1. *Rappel des méthodes épidémiologiques*

Les similitudes entre les symptômes décrits par les membres d'équipage et les dangers des polluants présents dans les cabines alimentent l'hypothèse d'une association entre les effets de santé et l'exposition à l'air contaminé. Pour conforter cette hypothèse les recherches scientifiques peuvent s'appuyer sur différents schémas d'études épidémiologiques (Tableau 1)⁶⁷.

Tableau 1- Synthèse des types d'études épidémiologiques (d'après Centre Cochrane Français⁶⁷)

Type d'étude	Design	Critère mesuré au départ	Critère mesuré à la fin	Principaux Avantages	Principaux Inconvénients
Transversale	- Non longitudinale - Non comparative	- Exposition - Evènement	NA	- rapide - coût faible	- Ne permet que des hypothèses étiologiques - Pas de chronologie exposition / évènement
Série de cas	- Non longitudinale - Non comparative	- Exposition - Evènement	NA		- Source de biais important
Cohorte	- Comparative (il existe un groupe de comparaison) - Prospective	- Exposition	Evènement	- Faisable quand la randomisation n'est pas possible - chronologie exposition / évènement	- Source de biais - Suivi long - Coût élevé
Cas témoin	- Comparative (il existe un groupe de comparaison) - Rétrospectif	- Evènement	Evènement	- Rapide - Coût faible - Maladies rares	- Source de biais - Pas de chronologie exposition / évènement
Essai contrôlé randomisé	- Comparative - Prospective	- Exposition (traitement évalué)	Evènement (effets du traitement)	- Minimise les biais (randomisation, double aveugle)	- Faisabilité de la randomisation - Généralisation des résultats à d'autres populations et la transposition à la pratique (critères de sélection)
Revue systématique	Synthèse des études originales	NA	NA	- Prend en compte l'hétérogénéité - Augmente la puissance statistique	- Biais de publication - Hétérogénéité trop importante

NA: non applicable

La causalité du lien, c'est-à-dire l'attribution équivoque de tout ou d'une partie de ces symptômes à la qualité de l'air, reste particulièrement difficile à démontrer. L'Institut de veille sanitaire (InVS)⁶⁸ propose différentes méthodes pour appréhender la causalité. Les études à « entrée » environnementale permettent de comparer des valeurs des niveaux de contamination à des valeurs limites réputées toxiques. Les études avec recueil de données individuelles englobent l'étude de cohorte comparant deux groupes exposés ou non (forte puissance si cohorte prospective en double aveugle) et l'étude cas-témoin compare l'exposition de sujets malades ou sains. Les études utilisant des biomarqueurs mesurent l'imprégnation à des agents chimiques ou l'exposition à des rayonnements ionisants. L'évaluation des risques d'une exposition pour la santé regroupe l'évaluation quantitative des risques sanitaires pour définir les effets de santé et l'évaluation d'impact sanitaire pour calculer le nombre de cas imputables à un facteur de risque.

5.3.2. Applications dans le cadre du syndrome aérotoxique

○ Evaluation quantitative des risques sanitaires :

Des auteurs⁶¹ appliquent un scénario de pire cas, à savoir une exposition simultanée et continue pendant 8 heures, aux concentrations maximales de COV et de produits de réactions

initiées par l’ozone, trouvées dans la littérature. Afin d’évaluer le risque, ces concentrations ont été confrontées à des valeurs limites. Ces valeurs limites correspondent à différentes valeurs toxicologiques de référence selon les données bibliographiques disponibles. Les auteurs ont également proposé certaines valeurs limites par calcul à partir de données toxicologiques lorsqu’aucune n’existait dans la bibliographie. Un quotient de danger (exprimé en %) est calculé en divisant les concentrations mesurées par les valeurs limites retenues. Il n’exprime pas une probabilité de survenue et est donc plutôt d’ordre qualitatif. Cette approche n’a pas permis de conclure que ces COV et produits de réactions initiées par l’ozone seraient responsables de la limitation des débits respiratoires ou des réactions sensorielles. L’hypothèse d’une relation entre les substances émises lors de combustions et les effets oculaires ainsi qu’inflammatoires des voies aériennes est cependant avancée. Les auteurs ne manquent pas de préciser que d’autres facteurs pourraient exacerber les symptômes sensoriels, notamment au niveau des yeux. Ainsi, la basse humidité relative et la basse pression sont aussi à prendre en compte, comme décrit ci-avant.

- Épidémiologie descriptive :

- Une première publication⁶² s’intéresse à la mortalité par les maladies neurodégénératives en fonction de la durée d’emploi, supposée traduire l’exposition à des « fume events ». Sont passées en revue la sclérose latérale amyotrophique (SLA), la maladie de Parkinson, la démence cérébrovasculaire et la démence non-cérébrovasculaire. Bien que la mortalité par SLA soit significativement supérieure chez les personnels navigants par rapport à la population générale, aucune relation claire avec la durée d’emploi n’a été mise en évidence. Par manque de données sur les « fume events », les auteurs n’ont pas pu évaluer quelle proportion de cette surmortalité par SLA était imputable à ces expositions. Force est de conclure que la durée d’emploi est une approximation imparfaite de l’exposition individuelle à l’air contaminé, notamment car elle s’applique à de nombreuses autres expositions (hypoxie, risques physiques etc.).

- Une deuxième étude⁶⁴ compare l’état de santé des membres d’équipage avec celui de la population générale pour évaluer l’éventuelle relation entre état de santé et durée d’exposition. Les résultats montrent une prévalence augmentée pour de nombreuses atteintes dont certaines sont liées à la durée d’exercice de l’activité. Au niveau respiratoire, les bronchites chroniques et autres maladies respiratoires comme les emphysèmes, les BPCO et les problèmes de sinus sont augmentées, sans être liées à la durée d’emploi. Selon les auteurs, cela pourrait être lié à l’exposition à l’ozone. Au niveau cardiaque, les maladies cardio-

vasculaires sont augmentées de façon significative (3,5X) chez les femmes exposées par rapport à la population normale. En plus de l'air possiblement contaminé par les moteurs, d'autres facteurs pourraient être associés à cette augmentation : bruit de l'avion (80-85 décibels), interruption de sommeil, exposition à l'ozone et au tabagisme passif (interdiction entre 1988-1999). Au niveau psychiatrique est notée une augmentation de l'incidence des troubles du sommeil et de la dépression. S'en suit au niveau général une fatigue fréquente, nécessitant un suivi médical pour 37% des personnels navigants mais sans rapport avec la durée d'emploi. Au niveau systémique, les auteurs notent aussi une augmentation significative de la prévalence des cancers reproductifs chez la femme dont le sein, les ovaires et l'utérus. Au niveau cutané, ce sont les cancers de la peau et la perte de cheveux qui voient leur prévalence augmenter, en relation avec la durée d'emploi. Les personnels ont par ailleurs fréquemment rapporté des maux de tête sévères, des vertiges et étourdissements, des engourdissements et picotements dans les extrémités et des pertes de mémoire. Le manque de données dans la population générale n'a pas permis de comparer les prévalences. Pour conclure, les prévalences de certains effets de santé sont significativement augmentées dans la population exposée et plus ou moins reliées à la durée d'emploi. Une relation avec la qualité de l'air pourrait expliquer certains de ces phénomènes mais cette étude ne permet pas de conclure définitivement sur ce point par manque de prise en compte des facteurs de confusion (horaires décalés, exposition aux Ultra-Violets (UV) etc.)

- Deux auteurs⁶³ enfin ont choisi de comparer les prévalences des effets de santé dans l'aéronautique avec celles de travailleurs de bureau. Il en ressort que les membres d'équipage sont plus fréquemment confrontés à des symptômes dermatologiques et nasaux (irritation, écoulement nasal, nez bouché), pouvant être dus à la faible humidité relative

○ Études utilisant des biomarqueurs^{4,28,51,69-74} :

Cette démarche vise à mettre en évidence l'exposition à des agents chimiques avec des études d'imprégnation faisant appel à des biomarqueurs⁶⁸.

Des auteurs²⁸ ont analysé les urines des pilotes et membres d'équipage exposés à des « fume events » pour rechercher les métabolites du TCP et d'autres tri-alkyle et tri-aryle phosphates (Figure 11).

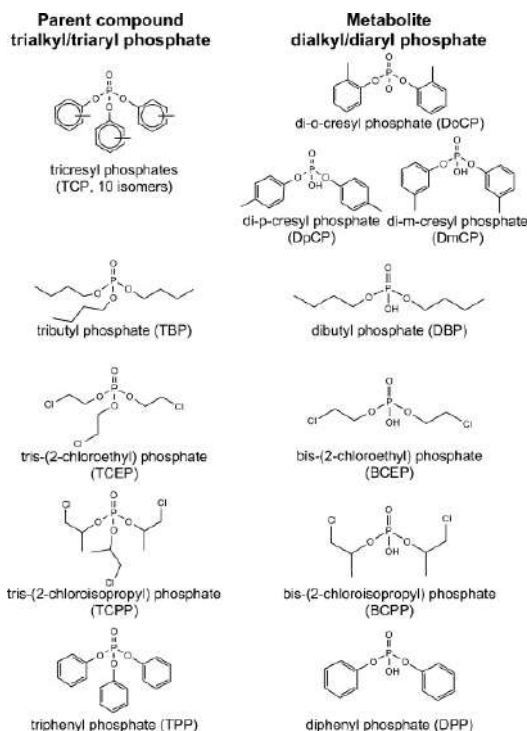


Figure 11- Structures chimiques des triaryl et trialkyl phosphates ignifugeants

Aucun des 332 échantillons d'urine ne contenait des métabolites du TCP à l'exception d'un échantillon contenant les métabolites des tri-méta-cresyl phosphate (TmCP) et tri-para-méthyl phosphate (TpCP) proches de la limite de détection (Figure 12). Ainsi le lien entre les effets de santé et une exposition au o-TCP neurotoxique, comme la réalité de l'exposition elle-même, ne sont pas évidents dans cette étude. Par contre, le dibutyl phosphate (DBP) et le diphenyl phosphate (DPP) ont été détectés dans tous les échantillons, le bis-(2-chloroethyl) phosphate (BCEP) dans 82% et le bis-(2-chloroisopropyl) phosphate (BCPP) dans 65%. Pour les trois premiers, le niveau était significativement plus élevé que dans la population générale, certainement à cause des matériaux ignifugés utilisés dans l'avion et des fluides hydrauliques (tributyl phosphate (TBP), triphényl phosphate (TPP)). L'analyse montre donc une exposition de l'équipage à des organophosphorés, pouvant expliquer certains effets de santé cités plus haut.

	BCEP		BCPP		DBP		DmCP		DoCP	DpCP		DPP	
	Air crew	Controls	Air crew	Controls	Air crew	Controls	Air crew	Controls	Air crew	Air crew	Controls	Air crew	Controls
LOD [$\mu\text{g/l}$]	0.1	0.1	0.1	0.25	0.2	0.25	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.2	0.25
$n > \text{LOD}$ (%)	82	50	65	12	100	4	0.3	0	0	0.3	0	100	68
Median ($\mu\text{g/l}$)	0.33	<0.1	0.16	<0.25	0.28	<0.25	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	1.10	0.52
P95 ($\mu\text{g/l}$)	6.32	1.12	1.22	0.36	1.38	<0.25	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	6.25	1.71
Max ($\mu\text{g/l}$)	20.3	27.5	6.87	0.85	9.72	0.26	0.62	<0.5	<0.5	0.55	<0.5	302.2	5.47
p (Mann-Whitney U)	<0.01		>0.05		<0.05		=		=	=		<0.001	

Figure 12- Niveau des métabolites des organophosphorés dans les urines des membres d'équipage ($n=132$) et contrôles issus de la population générale ($n=30$ pour BCEP, DPP, di-méta-cresyl phosphate (DmCP) et di-para-cresyl phosphate (DpCP), $n=25$ pour BCPP, DBP) (d'après Schindler et al.²⁸)

Les organophosphorés sont les molécules les plus pressenties pour engendrer les symptômes du syndrome aérotoxique. Leur devenir biologique a donc été étudié dans plusieurs travaux afin de tenter de relier les effets de santé à la qualité de l'air. Le ToCP, l'isomère le plus toxique, est métabolisé dans l'organisme par les cytochromes P450 en un métabolite particulièrement nocif : le CBDP. Ce dernier peut se lier de façon covalente à la sérine de la butyrylcholinestérase (BChE) dans le sang (Figure 13).

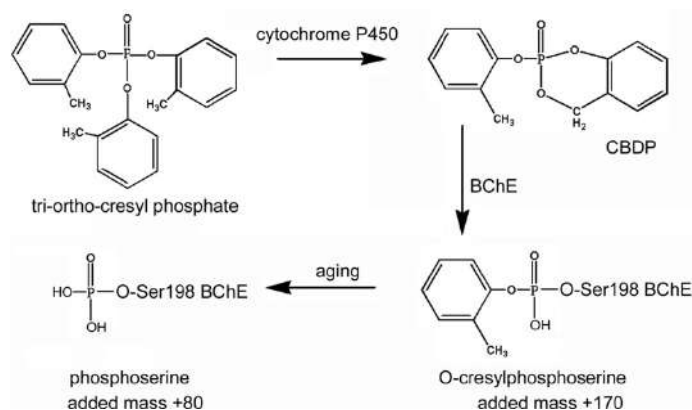


Figure 13- Métabolisme *in vivo* du ToCP (d'après Liyasova et al.⁶⁹)

La mesure de cet adduit peut s'effectuer par chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse (GC-MS)⁴, cristallographie aux rayons X (RX)⁶⁹, méthode immunomagnétique, chromatographie liquide à ultra-haute performance couplée à la spectrométrie de masse tandem (UHPLC-MS/MS)⁷⁰, spectrométrie de masse⁷², chromatographie liquide couplée à la spectrométrie de masse tandem (LC-MS/MS)⁷³. La quantité d'adduit chez un sujet traduit son exposition au TCP et pourrait donc être utilisée comme biomarqueur d'exposition. Plusieurs articles scientifiques ont été publiés relatifs à des méthodes spécifiques pour ce dosage. D'autres auteurs⁷⁰ présentent le développement d'une méthode immunomagnétique par UHPLC-MS/MS pour quantifier les BChE non liées à des adduits et l'adduit oCP-BChE (formé à partir de l'adduit CBDP-BChE par élimination de saligenine). Cette nouvelle méthode améliore considérablement la sensibilité en abaissant la gamme d'analyse entre 2,0 ng/mL et 150 ng/mL. Un ensemble d'auteurs⁷¹ propose, dans le même ordre d'idée, de diagnostiquer l'exposition à des bas niveaux d'organophosphorés en mesurant les activités totales d'AChE et de la BChE au moyen d'un kit de diagnostic rapide (Figure 14) : le ChE check mobile avec des kits de réactifs séparés démarrant la réaction cinétique pour la mesure des activités d'AChE et de la BChE dans le sang total au moyen

d'un photomètre portable. Des valeurs de référence ont été calculées sur une large série d'échantillons sanguins pour l'utilisation du kit (Figure 15), par exemple dans le cadre d'exposition militaire en vue d'estimer les expositions aux toxiques de guerre.



Figure 14- Composition du kit mobile ChE check pour la détermination sur site de l'activité de l'AChE et de la BChE dans le sang total (d'après Worek et al.⁷¹)

Parameter	Normal range (2.5th-97.5th percentile)
AChE (U/gHb)	33.0-49.4
BChE (U/L)	1623-3861
PChE (U/L)	2314-6426

Figure 15- Valeurs de référence des activités de l'AChE et de la BChE dans le sang total et le plasma (d'après Worek et al.⁷¹)

Les méthodes présentées ci-dessus pourraient donc devenir un moyen de relier les effets de santé avec la qualité de l'air. Cependant différentes limites sont à prendre en compte. Des adduits avec la BChE reliés à une exposition aux organophosphorés ont été identifiés suite à des vols, sans qu'il y ait nécessairement des symptômes de toxicité^{69,71}. Cette méthode doit être mise en place relativement rapidement après l'exposition pour des voyageurs occasionnels, les adduits disparaissant après 3 mois sans voyage en avion⁶⁹. De plus, l'adduit avec la BChE n'est pas spécifique à la seule exposition au CBDP⁷⁰. Ce biomarqueur est utilisé dans une autre étude⁷³ : dans ce travail, les auteurs ont évalué l'exposition de pilotes de chasse en bonne santé et sans symptôme par recherche de l'adduit BChE(Ser198)-CBDP. Aucun échantillon ne montre la présence de ce dernier récusant la preuve d'une exposition récente et/ou régulière dans les avions de chasse. D'autres composés présents dans l'air et non détectables par cette méthode pourraient alors être responsables de toxicité. La recherche fait également état d'autres biomarqueurs potentiels : la réaction du CBDP avec la tyrosine ou l'albumine du sérum humain⁷², le suivi de l'activité de l'acyl peptide hydrolase dans les cellules sanguines et la NTE dans les lymphocytes et les plaquettes⁶⁹. De façon moins spécifique, car pouvant être associés à plusieurs causes, ont été proposés le suivi du nombre des auto-anticorps contre les protéines du SNC qui augmenterait après exposition⁴ ou encore

l'observation des microstructures de la substance blanche (apparition de clusters), de la perfusion cérébrale (augmentation dans le cortex occipital gauche) et de l'activation cérébrale (diminution observée à l'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) fonctionnel)⁷⁴.

Enfin, les valeurs de référence peuvent ne pas être adaptées à tous les individus. Il existe en effet une forte variabilité interindividuelle en particulier pour l'activité de la BChE⁷¹ si celle-ci devait être utilisée comme biomarqueur d'effet.

Pour conclure cette recherche sur la potentielle relation entre la qualité de l'air et les effets de santé observés, nous pouvons dire que, quel que soit le type d'étude épidémiologique retenu, un début de lien entre des troubles neurologiques et les organophosphorés semble être consistant mais il est impossible de l'affirmer définitivement. La réalisation d'études reposant sur d'autres approches et/ou le recoupement entre toutes les données récoltées pourrait permettre d'établir la relation de causalité malgré les limites individuelles de chacune des recherches déjà effectuées.

6. Limites des études actuellement réalisées

Bien que nombreuses, les études actuellement réalisées font face à certaines limites développées ci-dessous.

- Design des études :

Les travaux mesurent souvent soit les molécules, par des méthodes d'échantillonnage, soit les effets de santé, par questionnaire auprès de personnels dont les critères d'inclusion ne sont pas toujours explicites, éventuellement accompagné d'une étude biologique. Cette approche dissociée ne permet pas d'explorer le lien de cause à effet. En effet, pour établir un lien de causalité entre ces deux paramètres, il faudrait mesurer au sein d'une même étude le taux de contamination de l'air et les effets de santé en résultant. Une publication⁶¹ a adopté dans ce sens une approche quantitative du risque. En utilisant les mesures de la bibliographie, les auteurs ont cherché les concentrations à partir desquelles l'exposition à certaines molécules pouvait être neurotoxique.

De façon similaire, peu de travaux ont pris en compte les paramètres spécifiques au milieu aéronautique. En effet, l'environnement dans un avion est particulier en terme d'humidité, d'altitude (et donc de pression) et de pression partielle en oxygène. Ces paramètres peuvent influencer la réponse de l'organisme humain ainsi que les méthodes d'échantillonnage. En plus de s'assurer de l'adaptabilité des équipements nécessaires aux mesures des contaminants, il pourrait donc être intéressant de mesurer ces constantes et de pouvoir ainsi analyser leur impact sanitaire, seules ou en association avec l'air potentiellement contaminé.

De plus, le choix de la population témoin est souvent problématique. Pour effectuer une analyse statistique avec une démarche d'épidémiologie analytique, il est nécessaire de disposer d'une population témoin comparable. Il faudrait alors recruter des témoins avec des facteurs de risque comparables à ceux des membres d'équipage (par exemple : horaires décalés) et partageant un maximum de ces facteurs de risque à l'exception de celui suspecté. Cette complexité est peu prise en compte dans les études, ce qui rend difficile la détermination de l'influence de la seule qualité de l'air.

Enfin, les travaux réalisés à ce jour ont été conçus pour échantillonner sur une période donnée l'ensemble des contaminants de la cabine (bruit de fond), tout en espérant recueillir un « fume event ». Lors de l'analyse des échantillons, il n'est alors pas possible de distinguer les molécules du bruit de fond des molécules du « fume event ». Pour pouvoir saisir les niveaux de contamination en cas de tel événement, il faut prévoir une approche adaptée, avec du

matériel activé rapidement au moment du « fume event ». C'est l'idée du projet Avisan qui sera brièvement décrit ci-après.

- Méthodes d'échantillonnage :

Concernant les méthodes d'échantillonnage employées, certaines limites peuvent également être constatées. En terme de sensibilité, bien des travaux se sont heurtés à des concentrations inférieures aux limites de détection. Nous essayerons donc par la suite de proposer les moyens les plus optimaux de ce point de vue.

De plus lors des mesures, il est difficile de prendre en compte les variations spatiales de la concentration en contaminants car les mesures sont ponctuelles. Le choix des endroits de prélèvement est donc crucial pour maximiser les chances de résultats. Il est par exemple conseillé de placer les échantillonneurs au niveau de la zone de respiration⁷⁵. Même en supposant le choix adéquat, une des difficultés est celle de parvenir à échantillonner pendant un événement massif lors d'une étude. Une des solutions serait de mettre à disposition de l'équipage un kit de prélèvement dont il pourrait faire usage en cas de « fume event » majeur. En outre, certaines interférences lors des échantillonnages peuvent avoir lieu. Nous pouvons par exemple relever l'influence de la quantité d'ozone qui peut altérer l'échantillonnage des aldéhydes⁷⁶.

Par contrainte matérielle, chaque étude focalise son attention sur une série de molécules limitée. Cela peut engendrer des données incomplètes car l'on ne trouve que ce que l'on recherche. Une publication⁷⁷ relate par exemple la découverte de molécules non signalées dans la composition des huiles et/ou non présentes dans l'huile neuve. Par ailleurs, il est difficile de comparer les publications relatant des campagnes de prélèvements dans des appareils variés, avec des méthodes d'échantillonnage diverses et ciblant des molécules différentes.

- Interprétation des résultats :

Face à la particularité du milieu aéronautique, certains auteurs s'interrogent sur l'applicabilité des valeurs limites d'exposition classiques. Ainsi existe-t-il des normes aidant à l'interprétation des mesures de qualité de l'air dans les cabines d'avion⁷⁸. Malgré cela, une divergence dans les limites d'exposition entre les différents pays peut compliquer les interprétations²¹ (Annexe 4). En outre, les normes couramment utilisées protègent des effets de santé lors des expositions chroniques mais apportent relativement peu d'éléments pour les expositions accidentelles comme lors des fume events par exemple.

Les diverses limites énoncées ci-avant témoignent de la nécessité d'une étude plus innovante dans laquelle s'inscrit notre travail.

OBJECTIFS

OBJECTIFS

Pour mieux comprendre l'origine du syndrome aérotoxique, plusieurs investigations avec campagnes de prélèvements ont été réalisées. Nous chercherons à réaliser ci-après une revue de la littérature pour en tirer les enseignements permettant d'optimiser les campagnes ultérieures. L'objectif principal est d'identifier les moyens matériels permettant de prélever les polluants pertinents dans le cadre d'une étude particulière, l'étude Avisan.

Tout d'abord nous rechercherons les différents polluants ayant été mesurés et leurs niveaux de concentration. Nous identifierons également les moyens de mesure mis en œuvre lors de ces échantillonnages. De façon complémentaire, les avantages et les inconvénients de ces derniers seront discutés. Nous nous pencherons plus particulièrement sur les contraintes de ces méthodes de prélèvement pour la réalisation de campagnes de mesures par les membres d'équipage eux-mêmes, pendant des événements odorants ou « fume events ».

Enfin un ensemble de moyens de mesure adaptés sera proposé pour la mise en place de cette campagne réalisée par les personnels navigants.

Cette démarche s'inscrit dans le contexte du projet AviSan, dont l'objectif est qu'il soit mis en œuvre au sein d'une compagnie aérienne française. L'originalité du projet AviSan réside dans la réalisation conjointe d'un volet expologique et d'un autre, épidémiologique. Le premier consiste en l'analyse de l'air prélevé sur un court pas de temps (environ 1 heure) pendant tout événement de contamination de l'air observé en vol. Ces prélèvements sont réalisés avec un dispositif pré-positionné dans la totalité de la flotte de la compagnie concernée. Le second volet est épidémiologique et portera sur tous les personnels navigants dont le vol a fait l'objet d'un échantillonnage suite à un événement majeur. Ces derniers feront l'objet d'un bilan clinique standardisé comportant notamment la recherche d'effets sur le système nerveux. Une telle méthodologie permet de répondre à divers objectifs. Premièrement, il s'agit de documenter et quantifier dans l'air des cabines les concentrations en polluants chimiques susceptibles d'entraîner des effets neurotoxiques différés, pendant les « fume events ». Deuxièmement, il s'agit d'identifier les déterminants de ces événements et les concentrations, liés aux modalités de vol ou d'exercice des professionnels. Enfin, il s'agit de comparer la symptomatologie et les performances cognitives de personnels navigants, selon leur exposition ou non à des « fume events » en tenant compte des conditions de travail : pour ce dernier objectif, un groupe témoin ad hoc sera réalisé.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

MATERIELS ET METHODE

Notre travail relatif aux polluants et à leurs méthodes d'échantillonnage, ainsi que le chapitre précédent, sont le fruit d'une revue de la littérature, en lien avec le syndrome aérotoxique. Des études générales sur le sujet ont été sélectionnées, ainsi que des publications sur les campagnes de prélèvements et d'analyses de l'air et des huiles, les effets de santé reportés, les caractéristiques des molécules retrouvées et leurs sources ou encore les moyens de mesure. Au sein de groupes de travail dédiés à la problématique, environ 150 articles ont été identifiés à partir d'une recherche par mots-clés puis par recoupement entre les publications. Les mots clés « syndrome aérotoxique », « aerotoxic syndrom », « événement de contamination de l'air », « fume event », « cabine d'avion », « aircraft cabin », « qualité de l'air », « air quality », « air contaminé », « contaminated air », « air de prélèvement », « bleed air », « organophosphorés », « organophosphates », « huile moteur », « engine oil » et « jet oil » ont été utilisés sur la base de données PubMed.

Par ailleurs, les besoins et avis des personnels impliqués ont été pris en compte, notamment par des échanges avec des membres d'équipage et de laboratoires d'analyses.

RÉSULTATS

RESULTATS

1. Polluants rapportés et gammes de concentration

L'étude de la provenance des polluants retrouvés dans l'air a montré qu'une partie provenait du « bleed air », contaminé accidentellement au niveau des moteurs, en particulier par des fuites d'huile. Ces huiles sont soumises à de très grandes différences de température, de -40°C lors d'un démarrage froid à plus de 250°C¹. La connaissance de la composition des diverses huiles employées est donc un moyen de mieux cibler les contaminants à rechercher en cas de « fume event ».

1.1. Étude de la composition des huiles moteurs

Les principales huiles moteurs actuellement utilisées sont les suivantes¹ : Mobil Jet engine oil II (Exxon Mobil), Mobil Jet engine oil 254 (Exxon Mobil), Mobil Jet engine oil 387 (Exxon Mobil), BP Turbo Oil 2380 (BP), BP Turbo Oil 2197 (BP), BP Turbo Oil 2389 (BP), Aeroshell Turbine Oil 560 (Shell) and Turbo Nycoil 600 (Petro-Canada). La première des huiles synthétiques citées ci-dessus représente presque la moitié du marché¹. Elles sont composées d'une matière de base, ingrédient principal pour assurer la bonne viscosité. Des additifs y sont ajoutés en petite quantité (<3% environ) pour améliorer les performances de lubrification, de lutte contre la corrosion etc. La liste complète des nombreux composés identifiés par analyse d'huiles commerciales est disponible en annexe (Annexe 5).

○ Huile avant pyrolyse^{1,2,8,13,49,65} :

- **Matière de base** : elle représente 95% de l'huile et est souvent indiquée par le fabricant comme « synthetic esters ». De manière courante il s'agit d'esters de pentaerythritol ou dipentaerythritol. Il peut aussi s'agir du triméthylolpropane ester (TMPE). Sa réaction avec le TCP est particulièrement étudiée en raison de la formation potentielle de triméthylolpropane phosphate (TMPP), connu pour sa neurotoxicité^{79,83}.

- **Additifs** : plusieurs études ont permis de dresser une liste plus ou moins exhaustive des composés retrouvés dans les huiles moteur avant usage. De façon quasi-constante est retrouvé l'antioxydant N-phenyl-1-naphthylamine (PAN) à des concentrations entre 0,25 et 5%. Le tricresyl phosphate est présent dans toutes les huiles citées ci-dessus (1-3%), à l'exception de la dernière qui contient du triisopropyl phényl phosphate (1-5%).

- Huile après pyrolyse^{2,24,29,80} :

De notre point de vue, cette analyse a une plus grande importance que celle sur l'huile neuve. En effet, les composés retrouvés dans l'huile usagée ou les vapeurs formées sont ceux susceptibles de passer dans l'ECS et de contaminer l'air de la cabine.

L'analyse des huiles a été réalisée en laboratoire avec un dispositif chauffant les huiles à haute température (entre 400 et 600°C). Les vapeurs sont dirigées vers une chambre d'émission pour être analysées. L'huile restante est analysée également. La liste des composés identifiés est disponible en annexe (Annexe 6).

Ces résultats nous permettent de saisir la complexité de la recherche des molécules pouvant contaminer l'air de la cabine. Malgré l'attention majeure portée au TMPP, toutes les analyses ne le détectent pas. D'une part, la montée importante en température n'empêche pas de retrouver certains composés initialement présents comme le TCP. Il faut noter que l'isomère le plus toxique, le ToCP, est peu retrouvé, seuls certains travaux montrent la présence de ToCP à des quantités proches de la limite de détection. D'autre part, le chauffage des huiles à haute température entraîne la néo-formation de nombreux produits et modifie leur composition. Dans les études de qualité de l'air, il faut donc penser à rechercher éventuellement ces molécules non présentes dans les huiles initiales. Les huiles usagées contiennent davantage d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), pouvant être associés à des combustions incomplètes. Il en est de même pour les aldéhydes, en particulier le formaldéhyde et l'acétaldéhyde. Les composés organiques volatils augmentent également avec la température, tout comme le monoxyde de carbone en raison de la combustion incomplète de l'huile.

Des limites restent à souligner quant à ces analyses de pyrolyse des huiles. Les expérimentations sont réalisées en laboratoire, en tenant compte des cas les plus extrêmes. La température et le temps de chauffage sont optimisés pour maximiser l'émission des composés organiques volatils et semi-volatils. Le flux d'air entrant dans la chambre d'émission expérimentale est différent de celui de l'air entrant dans la cabine, une transposition directe est donc difficile. Enfin, pour appliquer ces résultats à un modèle d'avion, il faut bien sûr prendre en compte le type de moteur, influençant notamment la température, et le trajet de l'air dans l'ECS, qui peut éliminer certains polluants par dépôt dans les conduits par exemple.

- Huile et bleed air :

Deux travaux très récents^{14, 81} se sont penchés sur la qualité du « bleed air » en relation avec l'injection d'huile dans le moteur. Tout d'abord, la première étude¹⁴ se penche sur l'influence

des paramètres de température et de pression lors d'une expérimentation avec simulateur de fuite d'huile. L'attention est portée en particulier sur les aldéhydes, le CO et les particules. Il est mis en évidence une augmentation de la concentration en aldéhydes avec la pression et la température au niveau du moteur, au moins jusqu'à 690 kPa. Une augmentation parallèle du CO est constatée. Enfin, les particules sont de concentration maximale et de taille minimale pour les pression et température les plus élevées. Cette analyse souligne l'impact de la phase et de la durée du vol sur la qualité de l'air des cabines, par la variation induite des paramètres au niveau du moteur. Bien que ce type d'étude sur simulateur permette d'étudier l'influence de différentes variables contrôlées, les résultats doivent être validés dans le cadre d'un moteur en fonctionnement dans un avion. C'est l'approche choisie par la seconde étude⁸¹, qui est la première publiée en ce genre. Elle s'intéresse plus particulièrement à la composition de l'air, en fonction de l'importance de la fuite d'huile et de l'emploi de technologies de purification. Les analyses mettent en évidence une augmentation des particules à partir d'un taux d'huile de 600 g/h. La concentration de ces dernières peut cependant être réduite de 60 à 70 % par les systèmes de purification d'air. Des faibles concentrations de TCP sont retrouvées, sans surprise, car il est initialement présent dans la composition de l'huile. Conformément aux résultats des explorations sur la pyrolyse des huiles, sont retrouvés de nombreux aldéhydes comme le formaldéhyde, l'acétaldéhyde, le butyraldéhyde et le propionaldéhyde. Cependant, les concentrations observées restent bien inférieures aux niveaux dangereux pour la santé établis par l'Occupational Safety and Health Act (OSHA). Ces mesures réalisées en lien avec un moteur d'un avion pleinement opérationnel (mais avec une fuite d'huile simulée) permettent de faire le lien avec les campagnes de prélèvement de l'air réalisées en vol. Nous nous attendons alors à retrouver les mêmes polluants.

1.2. Polluants détectés dans l'air

La synthèse des résultats des campagnes de prélèvement de l'air identifiées dans les sources bibliographiques est consultable en annexe (Annexes 7 à 18), classée par catégorie chimique. Les concentrations des molécules sont indiquées en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sauf indication contraire et les méthodes d'échantillonnage utilisées sont indiquées en tête de colonne. Le maximum d'informations a été recueilli pour chaque composé : la fréquence de détection (en italique), la concentration moyenne (en caractères réguliers) et la gamme de concentration mesurée (minimum-maximum retrouvés, en caractères gras). La durée d'échantillonnage est précisée

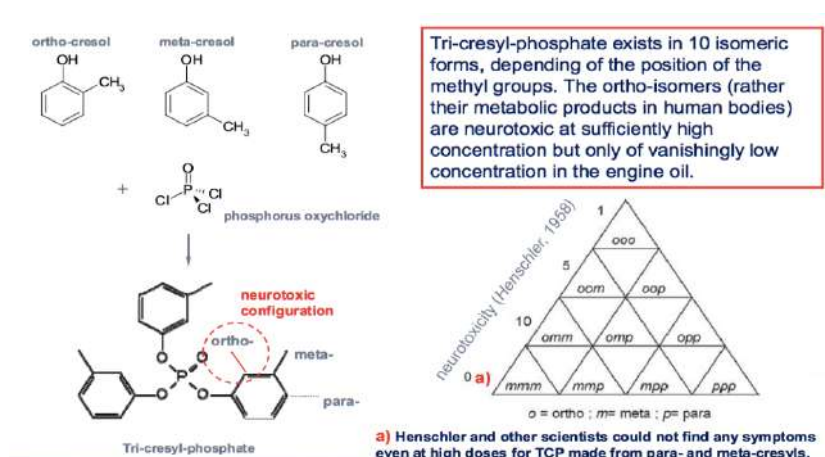
lorsqu'elle est disponible dans les sources consultées. Pour le traitement des données, un code couleur a été appliqué. Les cellules sont colorées en vert pour des concentrations maximales inférieures à $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ou en cas de non-détection, en orange pour des concentrations comprises entre 1 et $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et en rouge pour des concentrations supérieures à $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

1.2.1. Composés organiques semi-volatils (COSV)

Les composés organiques semi-volatils sont eux-mêmes divisés en plusieurs catégories de molécules chimiques. La catégorie la plus étudiée dans les campagnes de mesures demeure celle des organophosphorés. D'autres classes de molécules moins mesurées apparaissent aussi comme les phtalates ou les siloxanes.

○ Organophosphorés :

Le potentiel neurotoxique de ces composés, en particulier du TCP, explique l'intérêt dont ils font l'objet. Le TCP possède 10 isomères (Figure 16) et le ToCP reste le plus dangereux identifié à ce jour.



Pour les travaux réalisés dans l'air des cabines (Tableau 2), le maximum de **TCP** identifié est de $51,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et ce de façon exceptionnelle, les autres mesures de la même étude⁸³ étant inférieures à $1,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Quelques valeurs élevées sont également retrouvées dans d'autres études^{16,18} avec $49 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $28,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Hors ces concentrations extrêmes, les taux moyens de TCP détectés sont souvent assez faibles, entre $0,007 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $1,03 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Une des difficultés à fournir un intervalle de valeurs restreint réside possiblement dans la variation des taux de TCP en fonction de la phase de vol et de l'occurrence ou non de phénomènes accidentels type « fume event ». La phase de démarrage de l'avion semble être propice à des émissions de TCP importantes¹⁸.

Tableau 2- Durée d'échantillonnage, fréquence et concentrations (minimales, maximales, moyennes) de TCP mesurées dans l'air ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Publication	Durée	Fréquence	Min	Max	Moyenne
Crump et al. (2013) ¹⁶	1-8h	4%	ND	28,5	0,14
Hanhela et al. (2005) ¹⁸ VOL				2,1	0,013
Hanhela et al. (2005) ¹⁸ DEMARRAGE	9min-6h			49	1,03
Solbu (2011) ⁷⁷			ND	0,29	
Denola et al. (2011) ⁸³ AVION 1	0,08-0,33h		0,76	51,3	
Denola et al. (2011) ⁸³ AVION 2	2-10,2h		ND	0,26	
Denola et al. (2011) ⁸³ AVION 3	0,02-2,23h		ND	5	
de Ree et al. (2013) ²²	15-438 min		ND	0,16	
EASA (2017) ⁹		46%	ND	1,515	0,009
Houtzager et al. (2012) ⁸⁴			0,0005	0,155	0,007

ND : non-déecté

Les recherches de TCP sur les surfaces (Tableau 3) conduisent globalement à des concentrations non négligeables, allant jusqu'à $420 \text{ ng}/\text{dm}^2$.

Tableau 3- Fréquence et concentrations (minimales, maximales, moyennes) de TCP mesurées sur les surfaces (ng/dm^2)

Publication	Fréquence	Min	Max	Moyenne
Solbu (2011) ⁷⁷ COMPRESSE	39%	ND	8,3	2,3
Solbu (2011) ⁷⁷ CHARBON	0-6%	<1,3	270	
Lamb et al. (2012) ²¹ FIBRES DE VERRE		ND	420	
Houtzager et al. (2012) ⁸⁴ COMPRESSE		1	6	

ND : non-déecté

Lorsqu'elle est indiquée, La fréquence de détection sur les surfaces (0-39%) contraste avec celle de détection du TCP sur les filtres HEPA qui est de 100%⁷⁷, à un niveau de 1,1 à $42 \text{ ng}/\text{g}$ de filtre et par heure de vol.

A côté de cette exposition des personnels embarqués, il ne faut pas oublier l'exposition des personnels au sol. Les techniciens travaillant autour de l'avion font parfois face à des niveaux de TCP particulièrement élevés^{22,85} : $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $622,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Le problème est donc plus large que le seul champ des personnels navigants.

En ce qui concerne l'isomère le plus toxique, le **ToCP**, la majorité des publications récentes ne permet pas de le mettre en évidence^{9,77,84-86}, soit en raison de sa concentration inférieure aux

limites de détection, soit en raison de son absence dans la formulation de l'huile. Dans les cas où il parvient à être mesuré^{16,87}, il demeure en très faible concentration avec un maximum de $0,95 \mu\text{g}/\text{m}^3$. L'imputabilité des effets neurotoxiques au seul ToCP est de ce fait largement discutée.

Les isomères à trois positions identiques restants sont moins recherchés mais, le cas échéant, demeurent en dessous des limites de détection ou en faible quantité^{9,18,77,87}. Un maximum de $4,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ est obtenu pour le **TmCP** et le **TpCP**⁸⁷.

D'autre part, nous pouvons nous attarder sur les mesures d'un autre additif des huiles : le dibutyl phényl phosphate (**DBPP**). Il est retrouvé à une fréquence relativement élevée : entre 50 et 100% pour les prélèvements dans les cabines⁷⁷. Son niveau dans l'air reste faible^{9,77} : maximum de $0,77 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mais il peut être plus important sur les surfaces^{21,77} : maximum de $7\ 400 \text{ ng}/\text{dm}^2$.

Concernant le tris(2-chloroisopropyl)phosphate (**TCPP**) (additif des huiles et retardateur de flamme), seule l'étude de l'EASA⁹ s'y est intéressée. Les résultats montrent une fréquence de détection de 100% pour un maximum de $9,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Un dernier organophosphoré peut être souligné pour ses quantités légèrement supérieures : le tri-n-butyl phosphate (**TnBP**)⁷⁷. Il est retrouvé dans l'air avec une fréquence de 17 à 100% selon la méthode d'échantillonnage, jusqu'à $16\ 000 \text{ ng}/\text{dm}^2/\text{jour}$. Sa quantité varie^{77,87} de $0,02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ jusqu'à $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ avec d'autres maximums signalés à $4,1$ et $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Le TnBP est un composant majoritaire des fluides hydrauliques utilisés en aéronautique mais il possède également d'autres applications (retardateur de flamme dans certains plastiques par exemple), l'imputabilité à une source unique n'est donc pas possible.

Le tableau de synthèse des études sur les organophosphorés est consultable en annexe (Annexe 7).

- Classes chimiques moins documentées :

Peu d'auteurs se sont intéressés à ces composés, nous disposons donc de données parcellaires. Les deux campagnes de prélèvements les incluant ont des résultats contrastés en terme d'occurrence^{9,88}. Elles incluent le **diethyl phthalate** (respectivement 22% et 96%), du **dibutyl phthalate** (1,5% et 95%), du **diisobutyl phthalate** (4,4% et 92%). Les quantités mesurées⁹ sont comprises entre 4 et $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$. L'**anhydride phtalique** fait exception avec un maximum à $48,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ même si sa concentration moyenne reste faible : $0,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

En ce qui concerne les molécules azotées, nous pouvons noter la présence de **PAN**, additif des huiles se retrouvant donc dans l'air des cabines¹⁸, en faible quantité cependant : maximum

0,040 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. L'étude de l'EASA⁹ montre aussi la présence fréquente (82%) d'**acétonitrile** à une concentration moyenne relativement élevée (19,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) avec un pic à 269 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Deux autres molécules azotées peuvent aussi être soulignées : le **diméthylformamide** et le **diéthyltoluamide** pour lesquels des concentrations maximales de 541 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et 19,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ont respectivement été relevées dans la même étude⁹.

Retrouvés à une fréquence comprise entre 55 et 97 % selon les composés, certains siloxanes, entrant dans la composition de nombreux produits de consommation courante, dont des cosmétiques contenant des « silicones », peuvent enfin être mentionnés. Le **cyclopentasiloxane**, le **cyclotrisiloxane** et **cyclotetrasiloxane** présentent en effet des maximums respectifs à 277, 42,3 et 35,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Le tableau de synthèse des études sur les COSV moins documentés est consultable en annexe (Annexe 8).

1.2.2. Composés organiques volatils (COV)

○ Aldéhydes :

De nombreux auteurs ont étudié cette classe de composés en particulier le formaldéhyde, l'acétaldéhyde et le benzaldéhyde. Le **formaldéhyde** (Tableau 4) ^{9,13,25,30,76,86} peut atteindre des niveaux importants avec un maximum de 44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et d'autres mesures à 32 ou 13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sont signalées. Les concentrations moyennes se situent entre 5,0 et 8,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. **L'acétaldéhyde** ^{9,13,25,30,76,86} présente également des maximums élevés à 90, 70,2 et 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et des moyennes assez hautes entre 5,4 et 17,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Pour le **benzaldéhyde**, les maximums retrouvés sont de 106,2 et 15,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Il est signalé entre 67,6 et 100% des cas selon les études, avec un niveau moyen entre 0,6 et 6,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

A côté de ces aldéhydes majoritaires, nous pouvons aussi signaler d'autres molécules pouvant atteindre des concentrations détectables. Le **décanal** ^{9, 15, 89}, retrouvé entre 86 et 92%, présente des maximums de 62,2, 54,0 et 24,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Le récent rapport de l'EASA⁹ rapporte des concentrations maximales pouvant être importantes pour d'autres aldéhydes : 31,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour **l'octanal**, 31,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le **nonanal**, 14,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour **l'hexanal**, 13,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour **l'heptanal**. Les autres aldéhydes mesurés dans ce même rapport ont des concentrations inférieures à 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Les aldéhydes ne peuvent donc être négligés car de nombreux composés atteignent des concentrations maximales importantes, sont retrouvés avec une occurrence élevée et ont des effets de santé documentés.

Le tableau de synthèse des études sur les aldéhydes est consultable en annexe (Annexe 9).

Tableau 4- Concentrations (minimales, maximales, moyennes) de formaldéhyde mesurées dans l'air ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Publication	Min	Max	Moyenne
Nagda et al. (2013) ⁸⁶ TUBE CHARBON	<0,6	6	
Nagda et al. (2013) ⁸⁶ TUBE DNPH	3,7	32	8,6
Nagda et al. (2013) ⁸⁶ CANISTER ACIER- CARTOUCHE PUF	1,5	3,2	5,0
Nagda et al. (2013) ⁸⁶ CANISTER ACIER- CARTOUCHE DNPH	2,4	13	5,5
Rosenberg et al. (2015) ⁷⁶	0,4	44	5,7
Michaelis (2010) ¹³			3,9
EASA (2017) ⁹	2,7	13,9	

PUF : Mousse de polyuréthane ; DNPH : 2,4-dinitrophénylhydrazine

○ Cétones :

Les deux molécules régulièrement détectées sont l'acétone et la butanone. **L'acétone** (Tableau 5), retrouvée dans 90% à 100% des prélèvements^{9,90}, présente des concentrations maximales élevées^{9,13,86} jusqu'à $579 \mu\text{g}/\text{m}^3$. **L'hydroxyacétone** n'est détectée qu'à 34,1% dans les travaux de l'EASA⁹ mais atteint un maximum de $161 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Pour l'**acétophénone**, la fréquence de détection est identique et la concentration maximale atteinte est de $49,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Pour la **butanone** enfin, des maximums à $31,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sont mesurés pour une occurrence de 86%⁹. Les échantillonnages ciblent principalement l'acétone au détriment des autres cétones, pouvant cependant atteindre des concentrations importantes, comme en témoigne le récent rapport de l'EASA⁹.

Le tableau de synthèse des études sur les cétones est consultable en annexe (Annexe 10).

Tableau 5- Fréquence et concentrations (minimales, maximales, moyennes) d'acétone mesurées dans l'air ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Publication	Fréquence	Min	Max	Moy
Nagda et al. (2013) ⁸⁶ TUBE DNPH		7,4	579	58,4
Nagda et al. (2013) ⁸⁶ CANISTER ACIER		52	150	
Nagda et al. (2013) ⁸⁶ CANISTER ACIER- CARTOUCHE PUF		23	70	40,8
Nagda et al. (2013) ⁸⁶ CANISTER ACIER- CARTOUCHE DNPH		22	130	49,9
Michaelis (2010) ¹³				44,5
EASA (2017) ⁹	99,7%	0,8	87,2	15,7
Gao et al. (2013) ³¹	100%	1,3	100,5	
Wang et al. (2014) ¹⁵				0,46
Guan et al. (2013,2014) ^{89,90}	90%	ND	384,4	8,2

ND : non-détecté ; PUF : Mousse de polyuréthane ; DNPH : 2,4-dinitrophénylhydrazine

○ Acides :

Probablement pour des raisons analytiques (méthodes complexes), ils font l'objet de peu de recherches à l'exception de l'**acide acétique** (Tableau 6). Selon certaines études^{9,31,90}, il est retrouvé entre 95 et 100% à des concentrations moyennes entre 9,0 et 11,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ mais pouvant atteindre un maximum à 59,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Les travaux de l'EASA⁹ ciblent une gamme de composées plus élargie. Parmi ces derniers est relevé l'**acide benzoïque** avec une occurrence de 91%, une concentration moyenne de 5,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et surtout une concentration maximale jusqu'à 72,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Dans une moindre mesure, l'**acide formique** est également détecté. Malgré une fréquence de détection à 18%, sa concentration peut atteindre 33,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Ces molécules sont de bons candidats pour expliquer les odeurs évoquées par l'équipage. Il s'agit d'odeurs en général désagréables, fortes et âcres. Pour l'acide acétique, cette odeur piquante, âcre et vinaigrée est détectée dès 2450 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Pour l'**acide hexanoïque** (occurrence de 89% avec une concentration moyenne de 3,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et maximale de 16,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)⁹, il s'agit d'une odeur de fromage ou fruitée (ananas), voire de chèvre, d'où son nom d'acide caproïque. Le tableau de synthèse des études sur les acides organiques est consultable en annexe (Annexe 11).

Tableau 6- Fréquence et concentrations (minimales, maximales, moyennes) d'acide acétique mesurées dans l'air ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Publication	Fréquence	Min	Max	Moyenne
EASA (2017) ⁹	96,8%	0,1	59,4	11,8
Gao et al. (2013) ³¹	100%	0,75	8,98	
Wang et al. (2014) ¹⁵				11,43
Guan et al. (2013) ⁹⁰	95%			

○ Hydrocarbures aromatiques :

Plusieurs molécules présentent des concentrations élevées. Nous retiendrons plus particulièrement le **toluène** (Tableau 7), recherché dans de nombreuses études^{9,13,15,16,86,89-91}. Il est retrouvé à une fréquence de 96 à 100% et présente des maximums de 29 à 209,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Les concentrations moyennes retrouvées peuvent aussi être élevées, allant jusqu'à 68 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Les **xylènes** sont assez étudiés également. Ils sont retrouvés à des fréquences de 66 à 100% selon les isomères. Les p- et m-xylène atteignent les concentrations les plus importantes avec des maximums jusqu'à 70,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, pour le o-xylène, elles ne dépassent pas 62,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Le **benzène**^{9,15,86,89-91}, retrouvé pour 91 à 100% des prélèvements peut avoir des concentrations maximales assez hautes : de 6,0 à 77,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ avec une autre mesure à 53,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Les concentrations moyennes relevées suivent la même tendance avec trois mesures à 5,0, 8,2 et

10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. L'**éthylbenzène**, détecté dans 18,5 à 100% des prélèvements selon les études peut atteindre un maximum de 45,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Le **naphtalène**^{9,86,89,90} reste peu recherché. Retrouvé de 17 à 94% selon les études, sa concentration maximale s'élève parfois à 23,9 ou 49,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Le tableau de synthèse des études sur les hydrocarbures aromatiques est consultable en annexe (Annexe 12).

Tableau 7- Fréquence et concentrations (minimales, maximales, moyennes) de toluène mesurées dans l'air ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Publication	Fréquence	Min	Max	Moy
Cranfield (2013) ¹⁶		ND	170,2	13,93
Nagda et al. (2013) ⁸⁶ TUBE CHARBON		8	108	68
Nagda et al. (2013) ⁸⁶ TUBE DNPH		9	29	
Nagda et al. (2013) ⁸⁶ CANISTER ACIER- CARTOUCHE PUF		5,6	32	12,4
Nagda et al. (2013) ⁸⁶ CANISTER ACIER- CARTOUCHE DNPH		2,7	21	6,6
Nagda et al. (2013) ⁸⁶ TUBE ADSORBANT		2,2	488	
Michaelis (2010) ¹³				8,9
EASA (2017) ⁹	96,2%	ND	62,0	11,5
Wenjing et al. (2012) ⁹¹	100%	ND	40	
Wang et al. (2014) ¹⁵				13,41
Guan et al. (2013,2014) ^{89,90}	100%	ND	209,3	16,2

ND : non-détecté ; PUF : Mousse de polyuréthane ; DNPH : 2,4-dinitrophénylhydrazine

○ Alcanes :

Des auteurs⁹¹ ont identifié plusieurs alcanes dans 100% des échantillons prélevés. Il s'agit de l'undecane, du pentane, de l'octane, du nonane, de l'hexane, de l'heptane, du dodécane et du décane. Parmi ces derniers, certains ont été relevés avec des maximums importants⁹¹. L'**undecane** (Tableau 8) présente par exemple plusieurs valeurs élevées au regard de la moyenne des autres molécules : 60,3, 87,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Pour le **dodécane**, les concentrations maximales relevées sont de 30,0 et 17,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et pour le **décane**, de 43,7 et 16,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Le rapport de l'EASA⁹ a étudié une large gamme d'alcanes. La plupart présente des concentrations maximales élevées, supérieures à 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. C'est par exemple le cas du **méthylcyclohexane** retrouvé parfois jusqu'à 73,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, du **pentane**, jusqu'à 63,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, du **2,2,4,6,6-Pentamethyl heptane** jusqu'à 61,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, du **2,2,4,4,6,8,8-Heptamethyl nonane** jusqu'à 49,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, du **cyclohexane** jusqu'à 48,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Suivent également l'**heptane** (maximum de 24,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), l'**undécane** (maximum de 22,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), le **3-méthylpentane** (maximum de 18,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), le **tétradécane** (maximum de 13,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), le **nonane** (maximum de 12,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et le **tridécane** (maximum de 12,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Le tableau de synthèse des études sur les alcanes est consultable en annexe (Annexe 13).

Tableau 8- Fréquence et concentrations (minimales, maximales, moyennes) d'undécane C11 mesurées dans l'air ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Publication	Fréquence	Min	Max	Moyenne
Cranfield (2013) ¹⁶	75,3%	ND	87,3	2,74
Michaelis (2010) ¹³				1,3
EASA (2017) ⁹		ND	22,3	2,2
Wenjing et al. (2012) ⁹¹		ND	5	
Wang et al. (2014) ¹⁵				2,21
Guan et al. (2013,2014) ^{89, 90}	64%	ND	60,3	2,4

ND : non-détecté

○ Alcènes :

Le **limonène** (Tableau 9) s'impose par sa fréquence (entre 89 et 100%) et ses concentrations. Les moyennes retrouvées sont de 11,9 à 31,21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ avec des maximums de 45 à 1048,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La source du limonène est majoritairement constituée par les produits d'entretien, il faut bien sûr relier les concentrations élevées à l'utilisation de ces derniers. Le **menthol**, l'**isoprène**, le **3-carène**, l'**eucalyptol** et le **p-cymène** atteignent également des concentrations maximales supérieures à 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (respectivement 60,7, 46,8, 42,2, 40,3 et 33,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Le tableau de synthèse des études sur les alcènes est consultable en annexe (Annexe 14).

Tableau 9- Fréquence et concentrations (minimales, maximales, moyennes) de limonène mesurées dans l'air ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Publication	Fréquence	Min	Max	Moy
Leco (2013) ⁸⁸	93%			
Cranfield (2013) ¹⁶		ND	540,3	11,85
Nagda et al. (2013) ⁸⁶ CANISTER ACIER		2	45	
Nagda et al. (2013) ⁸⁶ CANISTER ACIER- CARTOUCHE DNPH		16,5	45,1	30,4
Nagda et al. (2013) ⁸⁶ TUBE ADSORBANT		2,4	117	
Michaelis (2010) ¹³				9,4
EASA (2017) ⁹	93,8%	ND	216	12,3
Wenjing et al. (2012) ⁹¹	100%	ND	126,62	
Wang et al. (2014) ¹⁵				31,21
Guan et al. (2013,2014) ^{89, 90}	89%	ND	15,1	1048,2

ND : non-détecté; DNPH : 2,4-dinitrophénylhydrazine

○ Alcools :

Quatre composés peuvent être signalés pour leurs concentrations élevées. Tout d'abord **l'éthanol** (Tableau 10) : ses concentrations moyennes s'élèvent de 82,3 à 3010 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour des maximums allant jusqu'à 5460 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. L'origine est alimentaire pour l'éthanol. Le **2-propanol** a aussi des concentrations importantes avec des maximums à 200 et 338,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Le **propylène glycol** atteint jusqu'à 580 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et le **2-ethylhexanol**, retrouvé dans 97% des échantillons⁹⁰, peut atteindre des concentrations de 30,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Certains de ces autres alcools pourraient provenir des fluides de dégivrage des avions en période froide. Les travaux de l'EASA⁹ ont aussi ciblé une large gamme d'alcools. Certains atteignent des concentrations maximales importantes : 1524 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le **1-propanol** (occurrence de 98%), 363 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le **1,2-propanediol** (98%), 248 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour l'**alcool isopropylique** (88%), 127 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour la **glycérine** (1,5%), 70,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le **1,3-butanediol** (70%) et 29,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le **2-phenoxyéthanol** (95%).

Le tableau de synthèse des études sur les alcools est consultable en annexe (Annexe 15).

Tableau 10- Fréquence et concentrations (minimales, maximales, moyennes) d'éthanol mesurées dans l'air ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Publication	Fréquence	Min	Max	Moy
Nagda et al. (2013) ⁸⁶ TUBE CHARBON		560	5460	3010
Nagda et al. (2013) ⁸⁶ TUBE DNPH		280	3349	1160
Nagda et al. (2013) ⁸⁶ CANISTER ACIER- CARTOUCHE PUF		280	4300	
Nagda et al. (2013) ⁸⁶ CANISTER ACIER- CARTOUCHE DNPH		20	3000	324
Nagda et al. (2013) ⁸⁶ TUBE ADSORBANT		100	4000	626
Michaelis (2010) ¹³				173,6
EASA (2017) ⁹	100%	7,0	616	82,3

PUF : Mousse de polyuréthane ; DNPH : 2,4-dinitrophénylhydrazine

○ Composés halogénés :

Peu d'études se sont penchées spécifiquement sur cette classe de composés. Le **tétrachloroéthène** ou **perchloroéthylène**, produit de nettoyage à sec (Tableau 11), reste le plus étudié avec une fréquence de détection⁹⁰ de 58 à 85%. Des concentrations importantes de 73,9 et 303,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sont notées. Par ailleurs, certains éthers diphenyl polybromés (PBDE) sont retrouvés en quantité non négligeable dans l'air : le **BDE 183** est mesuré jusqu'à 98 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et le **BDE 209** jusqu'à 2100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Le **1,4-dichlorobenzène** peut aussi être souligné. Sa fréquence n'est que de 65% mais il présente un maximum à 283,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Le

dichlorométane et les **dérivés perfluorés** sont peu recherchés et retrouvés (respectivement 11,2% et 14,4%) mais peuvent atteindre des maximums de 71,9 et 110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ selon l'EASA⁹. Le tableau de synthèse des études sur les composés halogénés est consultable en annexe (Annexe 16).

Tableau 11- Fréquence et concentrations (minimales, maximales, moyennes) de tétrachloroéthène ou perchloroéthylène mesurées dans l'air ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Publication	Fréquence	Min	Max	Moyenne
Cranfield (2013) ¹⁶		ND	20,1	0,43
Nagda et al. (2013) ⁸⁶		5	28	
Nagda et al. (2013) ⁸⁶		2,4	6,6	3,5
Nagda et al. (2013) ⁸⁶		2,8	12	5,1
Michaelis (2010) ¹³				7,3
EASA (2017) ⁹	57,9%	ND	73,9	3,8
Wang et al. (2014) ¹⁵				2,57
Guan et al. (2013,2014) ^{89, 90}	85%	ND	303,9	2,8

ND : non-déTECTÉ

○ Esters et éthers :

Au niveau des esters, c'est l'**acétate d'éthyle** qui a la plus forte occurrence : retrouvé à une fréquence de 88 à 90%⁹⁰, il peut atteindre des concentrations maximales de 68,1 ou 44,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. D'autres molécules atteignent aussi des maximums importants : l'**homosalate** (18%) atteint en particulier 114,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, l'acétate de butyl (55%) atteint 44,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ainsi que l'**isopropyl palmitate** (33%) et le **2-éthylhexyl salicylate** (62%) allant jusqu'à 19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ environ.

Seul le rapport de l'EASA⁹ s'est intéressé à l'échantillonnage des éthers. Trois molécules ont une faible occurrence mais atteignent parfois des concentrations très hautes : il s'agit du **1,1'-dipropane-1,2-diol ether** (3,5% et maximum de 124 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), du **1,2'-dipropane-1,2-diol ether** (3,5% et maximum de 114,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), du **methoxy-bis-1,2'-dipropane-1,2-diol ether** (3,5% et maximum de 142 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Le **diocetyl ether** est retrouvé plus souvent (93%), à une concentration maximale inférieure aux trois derniers mais restant quand même élevée (42,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Le tableau de synthèse des études sur les éthers et les esters est consultable en annexe (Annexe 17).

1.2.3. Paramètres généraux

De manière plus générale sont également suivis les biocides et les paramètres de qualité de l'air comme le taux de CO₂, d'O₃, de CO ou encore le niveau de particules.

Les **insecticides** sont mesurés dans divers travaux principalement par des échantillonnages de surface. Le niveau maximal retrouvé³² s'élève à 3,6 mg/cm² pour une concentration dans l'air de 1040 µg/m³. Les résultats restent difficilement comparables en fonction du délai entre l'utilisation de ces produits et l'échantillonnage.

En ce qui concerne les **particules**, peu de recherches les ont ciblées. Une récente publication²⁷ fait état de 362,3 à 124 665,1 particules/L avec 77% de particules entre 0,3 et 0,5 µm.

Enfin, le CO^{9,16} mesuré est compris entre des valeurs inférieures à la limite de détection (LD) (0,5 ppm) et 5 ppm, le CO₂^{9,27} entre 531 et 2771 ppm et l'O₃^{9,76} entre <LD (0,02 ppm) et 0,529 ppm.

Le tableau de synthèse des études sur les autres paramètres est consultable en annexe (Annexe 18).

2. Moyens de mesure mis en œuvre, avantages et inconvénients

Dans le but de déterminer le plus efficacement possible l'ensemble des contaminants potentiellement présents dans la cabine, une large gamme de méthodes analytiques a été mise en œuvre lors des différentes études. Deux types d'approches se distinguent. Premièrement, il existe les méthodes à long terme. En raison de la fréquence des « fume events », l'installation de moyens de prélèvements à bord de l'avion pour un temps long permettrait de maximiser la probabilité d'échantillonner lors d'un événement. Ces méthodes sont avant tout un bon moyen pour mesurer l'exposition des personnes à long terme. Au contraire de la majorité des passagers, il s'agit d'une exposition répétée pour les membres d'équipage. Enfin, des mesures sont également pratiquées sur les surfaces : elles permettent ainsi de quantifier l'exposition cutanée et les dépôts de polluants à long terme.

Secondement, il existe les méthodes à court terme. Leur durée s'échelonne de quelques minutes à quelques heures. Avant tout, elles ont pour but de saisir les contaminants lors d'un événement ou d'une phase de vol particuliers. Ces méthodes permettent tout de même d'avoir un aperçu de la qualité de l'air et des éventuels polluants à un instant donné.

Qu'il s'agisse des méthodes à court ou à long terme, un large panel est disponible selon le type de molécule ciblée.

2.1. Echantillonnage des surfaces

Ces méthodes ciblent essentiellement les organophosphorés et les pesticides. Certaines sont toutefois destinées à un échantillonnage de l'ensemble des résidus de surface sans cibler de molécule particulière (Figure 17).

○ Echantillonnage non ciblé :

Une publication²¹ propose d'utiliser des filtres en fibre de verre, imprégnés d'éthanol puis appliqués sur les surfaces. Le triethyl phosphate et l'acétate d'éthyle sont utilisés pour la désorption avant analyse par GC-MS. Il s'agit d'une méthode décrivant les expositions chroniques en raison du caractère intégrateur des surfaces. Appliquée à la recherche des organophosphorés surfaciques, la méthode offre des rendements d'extraction très variables : 14-100% pour le TBP, 14-100% pour le DBPP, 17-100% pour le TCP.

○ Echantillonnage des pesticides (Figure 17) :

L'échantillonnage des pesticides est plus spécifiquement des pyréthroïdes peut être réalisé sur les surfaces selon quatre méthodes, les trois premières correspondent à l'échantillonneur Lioy-Weisel-Waiman (LWW) ou à une variante^{33,34}. Premièrement, le prélèvement peut être réalisé par un filtre avec un disque de polyéthylène humidifié avec de l'alcool isopropylique. Deuxièmement, le prélèvement peut être réalisé par un filtre avec un disque de polyéthylène humidifié par de l'eau. Troisièmement, le prélèvement peut être réalisé avec du coton et fibres de nylon humidifiés par de l'eau. Quatrièmement, le prélèvement peut être réalisé avec du papier filtre rond Whatman mouillé avec de l'eau, l'opération étant réalisée deux fois, puis l'eau restante à la surface est récupérée par un filtre sec. Les capacités d'extraction sont respectivement de 90%, 46%, 74% et 90% pour les surfaces dures et de 14%, 20%, 40%, 70% pour les surfaces molles. Nous pouvons conclure au vu des résultats que l'échantillonnage sur surface dure est à privilégier. Des auteurs³⁴ ont ainsi choisi la méthode du papier filtre Whatman humidifié par de l'eau, sur surface dure. La limite de détection s'élève à 2 µg/cm² pour la perméthrine.

Résidus de surface non-ciblés	Insecticides
<i>Filtre en fibres de verre humecté à l'éthanol</i> - Temps d'échantillonnage : 60-90 min - Extraction : 14-100% pour les OPs	<i>Filtre avec disque de polyéthylène + Alcool</i> - LD : 2 µg/cm³ - Extraction : 90% (surfaces dures)
	<i>Filtre avec disque de polyéthylène + Eau</i> - LD : 2 µg/cm² - Extraction : 46% (surfaces dures)
	<i>Coton et fibres nylon</i> - LD : 2 µg/cm² - Extraction : 74% (surfaces dures)
	<i>Papier filtre Whatman</i> - LD : 2 µg/cm² - Extraction : 90% (surfaces dures)
⊕ - Quantification exposition répétée - Quantification exposition cutanée ⊖ Risque de contamination par contact direct avec le personnel	

d

Figure 17- Résumé des méthodes d'échantillonnage des surfaces

2.2. Echantillonnage de l'air

2.2.1. Méthodes à long terme

Il s'agit de méthodes d'échantillonnage installées au sein de l'avion pour une durée déterminée. Elles peuvent aussi consister en l'analyse de filtres déjà situés dans l'avion, le plus souvent au sein du système de climatisation. Dans le classement proposé, nous regrouperons dans les méthodes de prélèvement à long terme celles d'une durée supérieure à 12h. Cela correspond donc à la récolte de données sur plusieurs vols. Elles ont surtout été développées pour la mesure des organophosphorés.

- Echantillonnage des organophosphorés (OPs) (Figure 18) :

Le choix du matériel d'échantillonnage dépend de la catégorie d'OPs ciblée (Figure 18).

- **Non-volatils :**

Il est tout d'abord possible d'utiliser les éléments de l'avion. D'une part, les échangeurs de chaleur de l'ECS peuvent être analysés par rinçage à l'acétone puis concentration⁸³. D'autre part, les filtres HEPA de cabine peuvent de la même façon être traités par de l'acétonitrile pour l'extraction⁹². Cette méthode présente une capacité d'extraction de 96 à 109% pour le TCP. La durée d'échantillonnage correspond à la durée de vie des filtres, soit entre 1 et 3 mois. Par ailleurs, des compresses non-tissées ou des rubans d'aluminium^{77,92} peuvent être fixés aux murs pour réaliser des échantillonneurs surfaciques passifs. L'aluminium est préféré en raison du risque de réaction entre les matériaux polymériques des murs intérieurs de l'avion et des solvants organiques dont les compresses peuvent être imprégnées. Le temps d'échantillonnage varie aussi de 1 à 3 mois. La capacité d'extraction par dichlorométhane (DCM) varie entre 94% et 103% et permet d'obtenir une limite de quantification (LQ) de 0,008 µg/dm² (pour une surface d'échantillonnage de 10*35 cm²).

- **Volatils et semi-volatils :**

Pour ce type de composés, des bandes de charbon activé (ACC) Zorflex® sont utilisées. Elles sont extraites ensuite par du diméthyl formamide (DMF) et du disulfure de carbone (CS₂). Le temps d'échantillonnage va de 1 à 3 mois. La capacité d'extraction varie entre 25% et 61% pour les aryl phosphates (TPP, ToCP, TmCP, TpCP) car l'absorption est forte et de 94% à 98% pour les alkyls phosphates. La limite de quantification est de 0,11 µg/m³ (pour une surface d'échantillonnage de 10*10 cm²). Ces méthodes de surface ont pour principal risque la contamination par contact direct avec le personnel.

Organophosphorés		
Non- volatils	Semi-volatils	Volatils
<i>Filtres HEPA</i> - Temps d'échantillonnage : 1-3 mois - Extraction : 96-109% pour le TCP	<i>Charbon activé en bandes</i> - Temps d'échantillonnage : 1-3 mois - LOQ: 0,11 µg/cm² - Extraction : 25-61% (aryl phosphates) et 94-98% (alkyl phosphates)	
<i>Echangeur de chaleur ECS</i>		
<i>Ruban d'aluminium / Compresses non-tissées</i> - Temps d'échantillonnage : 1-3 mois - LOQ: 0,008 µg/cm² - Extraction : 94-103%		

Figure 18- Résumé des méthodes d'échantillonnage des organophosphorés à long terme

2.2.2. Méthodes à court terme

Ces méthodes visent à effectuer un échantillonnage ponctuel pour mesurer une exposition unique, par exemple en cas de « fume event ». De très nombreuses méthodes sont utilisées dans les publications à la fois pour les composés organiques volatils, semi-volatils, non-volatils et d'autres molécules ciblées. Des moyens de mesure sont également proposés pour mesurer des contaminants plus généraux comme le CO₂, le CO, l'ozone ou les particules.

- Echantillonnage des composés organiques volatils (COV) et semi-volatils (COSV) (Figure 19) :

Le matériel principalement utilisé est un tube absorbant Tenax TA à désorption thermique^{15,24,31,76,77}. Ce tube peut contenir du toluène d₈ comme étalon interne. Le débit recommandé est variable : entre 50 mL/min et 500 mL/min pour un temps d'échantillonnage entre 5 min et 10 h et un volume de 1 ou 2,5 L. Au lieu d'une pompe, nécessitant une batterie, une seringue de 50 mL peut être utilisée⁹⁰. D'autres techniques existent comme le tube adsorbant avec charbon activé et désorption au CS₂ ou encore le canister en acier inoxydable^{86,90}, utilisé pour un temps d'échantillonnage entre 30 et 120 min. Pour obtenir une concentration de COVs totaux, sans cible particulière, on peut utiliser un détecteur à photoionisation (PID)^{16,66,93} à batterie, pouvant être combiné avec un détecteur CO. Son débit est de 500 cm³/min et il offre une gamme de détection de 1 à 10 000 ppm mais ne réalise pas d'échantillon pour une identification ultérieure⁶⁶. De façon plus large, les tubes d'échantillonnage avec gel de silice et DNPH puis analyse par chromatographie liquide à

haute performance (HPLC) sont destinées aux composés organiques volatils et semi-volatils⁸⁶. Des cartouches en mousse de polyuréthane (PUF) sont destinées à l'échantillonnage des semi-volatils^{11,86}.

Composés organiques	
VOLATILS	SEMI-VOLATILS
<i>Tubes Tenax TA (+quartz wool) (+toluène d₈)</i> - Temps d'échantillonnage : 5min à 10h - Volume : 1 ou 2,5 L - Débit : 50-500 mL/min	<i>Cartouches en mousse de polyuréthane</i>
<i>Tubes SG 350</i>	
<i>Canister en acier inoxydable</i>	
<i>Tubes adsorbants charbon activé / désorption disulfure de carbone</i>	
<i>Détecteur à photo ionisation</i> LD: 1-10 000 ppm Débit : 500 cm³/min Ⓢ Insensible pression, humidité, température Possible combinaison avec capteur CO	
	<i>Tubes d'échantillonnage avec gel de silice / DNPH</i>

Figure 19- Résumé des méthodes d'échantillonnage des composés organiques volatils et semi-volatils

○ Echantillonnage des organophosphorés (OPs) :

- **ORGANOPHOSPHORÉS TOTAUX** : les composés organophosphorés présentent des différences de volatilité importantes. Il faut combiner différentes méthodes pour capturer l'ensemble : un filtre et un adsorbant sont en général couplés pour une collecte complète.

Un groupe d'auteurs⁹⁴ a testé différentes combinaisons de filtres et d'adsorbants afin de déterminer la plus efficace. Pour le filtre situé dans une cassette pour collecter les OPs non-volatils (aryl et alkyl phosphates), il a testé la fibre de verre ou le polytetrafluoroéthylène (PTFE). Le filtre en fibre de verre est préféré au vu du résultat pour sa meilleure rétention et sa meilleure capacité au long terme. Pour l'échantillonnage des aérosols d'huile, le filtre en acétate de cellulose est par ailleurs proposé⁸⁵. En ce qui concerne l'adsorbant pour les composés volatils (alkyl phosphates) et ceux passant à travers le filtre, différents matériaux sont testés (charbon actif de noix de coco (Anasorb CSC) et 747, polymères organiques poreux Chromosorb 106 et (hydroxyméthyl-2)pipéridine (XAD2), gel de silice hautement polaire), avec différents solvants d'extraction (CS₂, CS₂-diméthylformamide, toluène, DCM, méthyl-t-butyl éther, méthanol). Le couple Chromosorb 106 et DCM est préféré. Cette technique permet en un temps d'échantillonnage de 2 h avec un débit de 1,5 L/min, d'obtenir une limite de quantification de 75 ng/m³ (Figure 20). Les capacités d'extraction sont de 93 à

106% pour le tri-iso-butylphosphate (TiBP), TnBP et TmCP. Le stockage à 28 jours est possible sans perte apparente d'organophosphorés (récupération de 98 à 102% pour un stockage à 5°C)^{92,94}.

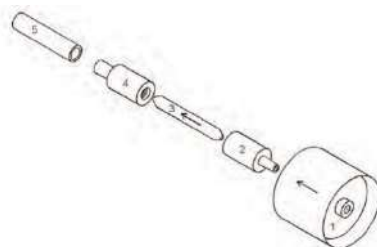


Figure 20- Schéma du montage d'échantillonnage complet (12 cm) avec la cassette contenant le filtre (1), le tube adsorbant (3), des surfaces inertes pour le montage (2,4) et le connecteur à la pompe d'échantillonnage (5)(d'après Solbu^{92,94})

D'autres combinaisons de filtres et d'adsorbants sont proposées dans la littérature. Les filtres en quartz potentiellement imprégnés avec le tributyl phosphate d_{27} et triphenyl phosphate d_{15} comme étalons internes, couplés à une mousse de polyuréthane, puis extraits au DCM sont utilisés avec un débit entre 1 et 10 L/min^{9,76,87}. La norme de l'Association française de normalisation (**AFNOR**) sur le mesurage des ignifugeants basés sur des composés organophosphorés⁹⁵ propose une méthode très similaire. Il s'agit d'un appareil en verre avec filtre en fibres de verre et mousse de polyuréthane ou adsorbant XAD2 (Figure 21). Le temps d'échantillonnage est de 1 h avec un débit de 2,7 à 2,8 m³/h.

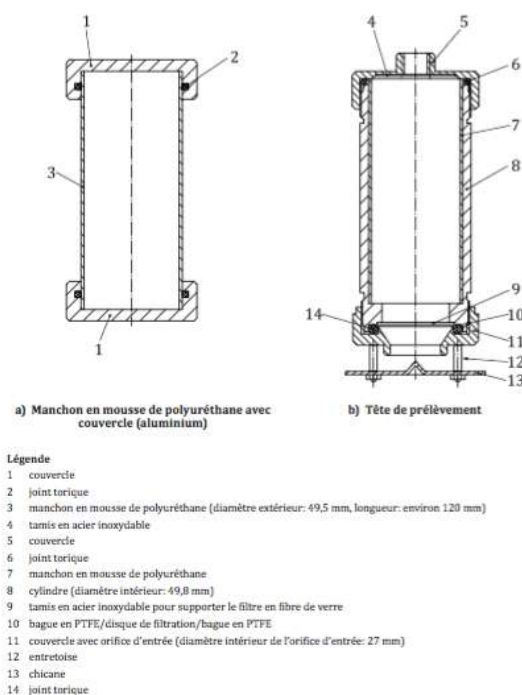


Figure 21- Appareil d'échantillonnage constitué d'une tête de prélèvement équipée d'un manchon pour retenir les mousses de polyuréthane (norme AFNOR⁹⁵)

Sont également retrouvés les filtres en PTFE et fibres de verre avec tube absorbant Chromosorb puis extraction au DCM^{22,24}. L'utilisateur peut préférer un temps d'échantillonnage court : de 15 à 35 min avec un volume d'échantillonnage entre 0,03 et 0,06 m³ ou un échantillonnage stationnaire : de 6 à 7,5 h avec un volume d'échantillonnage de 0,767 à 0,875 m³. Enfin il existe aussi des filtres en fibre de verre et tube en gel de silice, extraits au méthyl tert-butyl éther (MtBE)⁸⁷.

Pour les COV et les COSV, Solbu⁹⁶ a développé un échantillonneur en cas d'incident (Figures 22 et 23). Il est composé d'un tube en verre ou en acier inoxydable avec un matériel adsorbant (Tenax TA pour les COSV et stabilité optimale dans le temps, Chromosorb 106 pour les COSV et Anasorb CS pour les COV) et d'une petite pompe de débit 200 mL/min. Avec un temps d'échantillonnage de 30 à 60 minutes, il permet de prélever un volume de 6 L et d'atteindre des seuils de détection de 3 µg/m³ à 0,03 µg/m³ selon le mode de fonctionnement du spectromètre de masse. La capacité d'extraction obtenue à partir de cet appareil par désorption thermique est de 93 à 97%. Il présente encore comme avantages d'être stable pendant 1 mois grâce à des vannes étanches, d'être rapide et simple d'utilisation car activé par pression d'un bouton et d'être facilement transportable par ses petites dimensions. Par ailleurs, l'appareil peut être modifié pour échantillonner aussi les semi- et non-volatils en ajoutant des filtres.

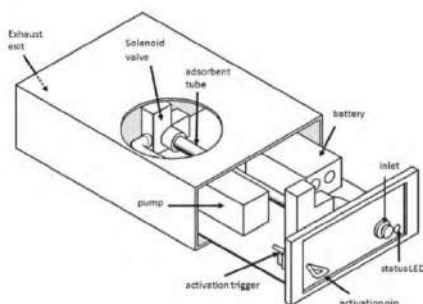


Figure 22- Vue ouverte de l'échantillonneur de Solbu (d'après Solbu^{92,96})



Figure 23- Photo de l'échantillonneur de Solbu (d'après Solbu⁹²)

- **TRICRESYL PHOSPHATE** : de nombreuses méthodes ont été utilisées dans la littérature en ciblant spécifiquement cette molécule. Le **manuel des méthodes analytiques** (1994)⁹⁷ et les fiches toxicologiques de l'Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des maladies professionnelles et des accidents du travail (**INRS**) (1994-2014)⁹⁸ recommandent l'utilisation de filtres en ester de cellulose (Figure 24) et une désorption par éther diéthylique avant dosage par chromatographie en phase gazeuse avec détection thermo-ionique. En pratique d'autres modes de détection comme la spectrométrie de masse peuvent être utilisés. Le débit proposé est de 1 à 3 L/min pour un volume de 2 à 100 L soit un temps d'échantillonnage de 1 à 100 minutes. Pour 100 L, la gamme de mesure s'étend de 0,002 à 2 mg/m³. Différentes études ont utilisé cette stratégie^{18,65} avec un temps d'échantillonnage de 5 à 20 minutes et un débit de 36 L/min.



Figure 24- Montage avec filtre et pompe pour échantillonnage de courte durée (10-20min) (d'après Hanhela et al.¹⁸)

L'échantillonneur de **Van Netten**⁹⁹ est aussi une application de cette méthode (Figure 25). Il comporte un filtre de 37 mm en ester de cellulose mixte (MCE) ou en micro-quartz Whatman (QMA) et une pompe à piles de débit 0,7 à 0,8 L/min. Le temps d'échantillonnage va jusqu'à 6 heures. Pour collecter le TCP, les filtres en QMA sont préférés car ils permettent un meilleur débit. Cet échantillonneur présente de nombreux avantages : compact et petit, il est facilement transportable ; autonome avec ses piles et préassemblé, il est simple et rapide à activer ; il est peu coûteux (< 300 €), possède un dispositif anticontamination, ne crée pas d'interférence électromagnétique et permet une capture fiable et efficace des TCP et autres composés des huiles dans l'air.



Figure 25- Echantillonneur de van Netten (d'après van Netten⁹⁹)

Enfin, un dernier montage est utilisé pour certains prélèvements⁶⁶ : il s'agit d'un tube absorbant Porapak Q (« sorbent ») encadré par de la laine de verre (« glass wool ») avec une pompe (Figure 26). L'extraction est réalisée à l'iso-hexane. Le temps d'échantillonnage est de 2 à 6 heures avec un débit de 2 L/min. De plus, il respecte les interférences électromagnétiques.

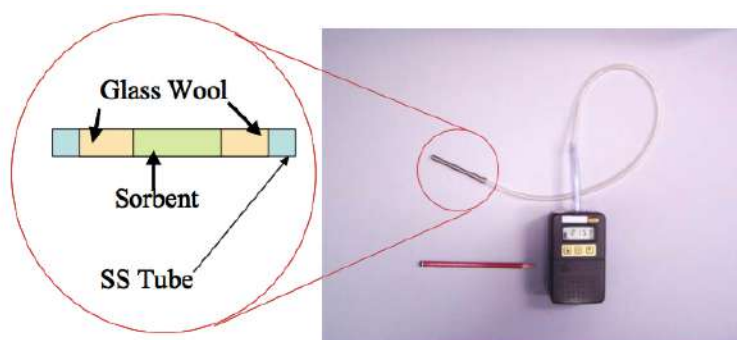


Figure 26- Montage avec adsorbant et pompe pour échantillonnage de longue durée (>3heures) (d'après Hanhela et al.¹⁸)

Techniquement, ces dernières méthodes présentées pour le Tricresyl phosphate peuvent cependant servir à la détection d'autres organophosphorés. Cependant, comme elles ont été développées et utilisées pour rechercher le TCP, nous avons préféré les présenter de façon distincte. L'ensemble des méthodes d'échantillonnage des organophosphorés est rassemblé dans la figure ci-après (Figure 27).

Organophosphorés		
TOTAUX	VOLATILS ET SEMI-VOLATILS	TRICRESYL PHOSPHATE
Combinaison filtre + adsorbant - Filtres : fibre de verre, PTFE, acétate de cellulose - Adsorbants : charbon actif, polymères organiques poreux, gel de silice - LOQ: 75 ng/m³ - Débit : 1,5 L/min - Extraction : 93-106%	Echantillonneur si incident : tube verre ou acier inoxydable + matériel adsorbant * Adsorbants : Tenax TA, Chromosorb 106, Anasorb CS - Temps d'échantillonnage: 30-60 min - LD : 0,03-3 µg/m³ - Débit : 200 mL/min - Extraction : 93-97% ⊕ Stable 1 mois, rapide, simple, transportable, modifiable pour sVOCs	Filtres en ester de cellulose - Temps d'échantillonnage: 1-100 min - LD : 0,002-2 mg/m³ - Volume : 2-100 L - Débit : 1-3 L/min
Filtres en quartz marqué + mousse de PUR Débit : 1-10 L/min		Echantillonneur de Van Netten : filtre MCE ou QMA - Temps d'échantillonnage: jusqu'à 6h - Débit : 0,7-0,8 L/min ⊕ Compact, transportable, autonome, simple, rapide, peu coûteux, pas d'interférences électromagnétiques, capture fiable TCP
Appareil avec filtre en fibres de verre + mousse PUR ou adsorbant XAD-2 - Temps d'échantillonnage: 1h - Débit : 2,7-2,8 m³/h		Tube absorbant Porapak Q + Laine de verre - Temps d'échantillonnage: 2-6 h - Débit : 2 L/min ⊕ Respect des interférences électromagnétiques
Filtres en Téflon et fibres de verre + tube adsorbant Chromosorb - Temps d'échantillonnage: 15-35 min ou 6-7,5h - Volume: 0,03-0,06 m³ ou 0,767-0,875 m³		
Filtres en fibres de verre + tube gel de silice		

Figure 27- Résumé des méthodes d'échantillonnage des organophosphorés

○ Echantillonnage des aldéhydes et des cétones (Figure 28):

De façon générale, il est recommandé dans la guideline de l' « American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers » (ASHRAE)¹⁰ d'échantillonner sur deux cartouches en série : la première pour enlever l'ozone résiduel et la deuxième pour la conversion chimique des aldéhydes en composés plus stables ou bien une seule cartouche avec deux médias filtrants différents. A l'inverse, un autre ensemble d'auteurs⁷⁶ ne démontre pas d'influence notable de l'ozone dans des appareils équipés de convertisseur.

La cartouche le plus fréquemment utilisée est une cartouche DNPH^{9,21,24,76,89}. Le DNPH imprègne un gel de silice et permet une réaction spécifique avec le groupe carbonyle en présence d'un acide. La désorption est effectuée par l'acétonitrile puis mesure HPLC avec détecteur UV à 365 nm. Pour l'acétaldéhyde, la limite de quantification est de 4 µg/m³ avec un volume de 6 L; pour l'acroléine, il est de 20 µg/m³ pour 20 L et pour le formaldéhyde, il est de 11 µg/m³ pour 6 L. Ainsi avec un débit de 0,3 L/min^{9,76}, cela correspond respectivement à des temps de prélèvement de 20, 67 et 20 minutes. La norme **AFNOR 4168**¹⁷ propose un échantillonnage avec un barboteur type widget avec solution T de Girard et mesure par HPLC avec détecteur UV à 245 nm. Pour un volume de 60 L, le seuil de détection de la méthode est de 18 µg/m³. Certaines études³⁰ ont utilisé une combinaison d'adsorbants (Tenax TA, Carboxen 569, Carbosieve III) avec un débit de 20 mL/min et un volume d'échantillonnage de 3 à 10 L selon le temps de vol (de 2,5 à 8 h).

Par ailleurs, il existe des moyens plus spécifiques pour certains aldéhydes ou cétones, décrits ci-après.

- **ACÉTONE** : la méthode recommandée est un échantillonnage sur charbon actif avec désorption par disulfure de carbone et mesure par chromatographie en phase gazeuse avec détecteur à ionisation de flamme (GC-FID). Selon le volume de prélèvement (0,5 ou 40 L), le seuil de détection varie (100 mg/m³ ou 0,5 mg/m³)⁴⁰.

- **ACROLÉINE** : selon la norme¹⁷, des cartouches de silice imprégnées de DNPH avec désorption par l'acétonitrile peuvent être utilisées, ou bien un échantillonnage sur tube XAD2. Dans ce cas s'en suit une désorption par le toluène avant mesure par GC et un détecteur spécifique azote. Les limites de détection ainsi obtenues sont respectivement de 0,02 mg/m³ pour un volume de 20 L de 0,12 mg/m³ pour 24 L.

- **BUTANONE** : la méthode recommandée est un échantillonnage sur charbon actif avec désorption par disulfure de carbone et mesure par GC-FID¹⁷. Pour un volume de prélèvement de 3 L, le seuil de détection est de 50 mg/m³. Une alternative est l'échantillonnage sur gel de

silice (Silicagel) et désorption par diéthyl éther suivi d'une mesure par GC-FID. Le seuil de détection atteint pour un volume de 10 L est de 1,7 mg/m³.

- **FORMALDÉHYDE** : il s'agit soit d'un échantillonnage sur sorbant solide DNPH avec désorption par l'acétonitrile, soit de la même méthode sur sorbant liquide XAD2 que pour l'acroléine¹⁷. Les limites de détection sont respectivement de 0,011 mg/m³ pour un volume de 6 L et de 0,3 mg/m³ pour un volume de 10 L.

Aldéhydes et cétones					
GÉNÉRAL		ACÉTONE	ACROLÉINE	BUTANONE	FORMALDÉHYDE
Cartouches DNPH - LD : *Acétaldéhyde (1) : 4 µg/m³ *Acroléine (2) : 0,02 mg/m³ *Formaldéhyde (3) : 0,011 mg/m³ - Volume : (1)(3) 6L, (2) 20L	⊕ - Spécificité pour large gamme d'aldéhydes et de cétones - Coût faible - Prélèvement facile ⊖ - Stockage au frais pour limiter les contaminations - Seuils de détection limite pour notre utilisation - Interférences possibles avec azote, oxyde d'azote, eau	Echantillonnage sur charbon actif/ désorption disulfure de carbone - LD : 100 ou 0,5 mg/m³ - Volume : 0,5 ou 40 L	Cartouches DNPH/désorption actif/ désorption acétonitrile - LD : 0,02 mg/m³ - Volume : 20 L	Echantillonnage sur charbon actif/ désorption disulfure de carbone - LD : 50 mg/m³ - Volume : 3 L	Tube (hydroxyméthyl-2)pipéridine sur XAD/ désorption toluène - LD : 0,3 mg/m³ - Volume : 10 L
Barboteur widget avec solution T de Girard - LD : 18 µg/m³ - Volume : 60L	⊕ - Sensibilité ⊖ - Fragilité matériel - Poste de prélèvement fixe		Tube XAD2/ désorption toluène - LD : 0,12 mg/m³ - Volume : 24 L	Gel de silice/ désorption diéthyl éther - LD : 1,7 mg/m³ - Volume : 10 L	Cartouches DNPH/ désorption acétonitrile - LD : 0,011 mg/m³ - Volume : 6 L
Tubes absorbants (Tenax TA, Carboxen 569, Carbosieve III) - Débit : 20 mL/min - Volume : 3-10 L	⊕ - Stockage 18j à TA - Prélèvement efficace pour courtes et longues durées ⊖ - Faire un blanc car les tubes commercialisés peuvent contenir des résidus d'aldéhydes				

Figure 28- Résumé des méthodes d'échantillonnage pour aldéhydes et cétones

○ Echantillonnage des pesticides :

La majorité des auteurs a utilisé des matériels adsorbants de différents types : tube adsorbant XAD-4⁸³, disques en PUF³², polyéthylène basse densité rempli de trioléine³². Est également retrouvé un échantillonneur passif plus sophistiqué (Figure 29) constitué de segments de verre recouverts par un film fin de polymère et trempés dans une solution d'éthylène vinyl acétate dissous dans du DCM. Le tout se trouve dans un contenant en aluminium. Les auteurs revendiquent 113% d'extraction pour la phénitrine, 86% pour cis- et trans-permethrine³².



Figure 29- Prototype de l'échantillonneur en verre recouvert de polymère dans son contenant en aluminium (d'après Maddalena et McKone³²)

○ Echantillonnage des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et des aromatiques (Figure 30) :

- **HAP** : de manière consensuelle, ils sont échantillonnés à l'aide de tubes absorbants. Il peut s'agir de tubes XAD-2 suivi d'une extraction au toluène ou d'une cartouche PUF⁸⁶.

- **BENZÈNE** : la chromatographie en phase gazeuse portable avec détecteur par photo-ionisation permet d'atteindre un seuil de détection de 0,03 mL/m³. L'échantillonnage sur charbon avec désorption par disulfure de carbone puis mesure par GC-FID permet d'atteindre un seuil de détection de 0,12 mg/m³ avec un volume de 40 L. Ce sont les deux méthodes proposées par la norme **AFNOR 4168**¹⁷.

- **TOLUÈNE** : l'échantillonnage peut se faire sur tube à adsorption comme le tube Tenax TA suivi d'une désorption thermique et d'une chromatographie en phase gazeuse¹⁷.

Hydrocarbures aromatiques polycycliques et aromatiques		
HAP	BENZÈNE	TOLUÈNE
<i>Tubes absorbants :</i> - XAD-2 - Mousse de polyuréthane	<i>charbon actif / désorption par disulfure de carbone</i> - LD : 0,12 mg/m ³ - Volume : 40 L	<i>Tubes absorbants :</i> - Tenax TA

Figure 30- Résumé des méthodes d'échantillonnage des hydrocarbures aromatiques polycycliques et aromatiques

○ Echantillonnage des paramètres généraux :

- **OZONE (O₃)** : l'AFNOR dans sa norme sur la qualité de l'air intérieur dans les cabines des avions¹⁷ (2010) recommande la mesure de l'ozone par une technique de chimioluminescence pour un seuil de détection de 1,5 ppb ou par un échantillonneur contenant du carmin d'indigo et mesure par spectrométrie visible (623 nm) pour un seuil de détection de 0,5 ppb pour un volume d'échantillonnage de 80 L. La guideline de la société ASHRAE (2012)¹⁰ recommande l'utilisation soit d'un détecteur électrochimique comme appliqué dans certaines travaux^{9,93}, ou bien d'un détecteur à absorption UV (254 nm) comme le 2B Technology model 205 Dual Beam Ozone Analyser. Cette méthode est d'ailleurs recommandée, car plus fiable que la précédente. Elle est utilisée dans plusieurs campagnes de prélèvements^{30,76} et permet en 1 minute environ de fournir la concentration d'O₃ avec une sensibilité de 1 ppb.

- **MONOXYDE DE CARBONE (CO)** : la norme AFNOR¹⁷ et la guideline ASHRAE¹⁰ préconisent toutes deux un détecteur à adsorption infra-rouge (IR) non dispersive. Cette méthode est utilisée dans les rapports de l'« Airliner Cabin Environment Research » (ACER)

(2013)⁹³ et EASA (2014)⁹ et permet d'obtenir un seuil de détection à 0,1 ppm. Un détecteur électrochimique peut également être employé^{9,10,16,93} et donne une gamme de détection entre 0,1 et 10 000 ppm.

- **DIOXYDE DE CARBONE (CO₂)** : comme pour le CO, il est préconisé par les deux normes^{10,17} d'utiliser un détecteur à adsorption IR non dispersive dont le seuil de détection est <2%. C'est par exemple le capteur de CO₂ TELAIRE 7001^{27,66,91}, donnant une gamme de détection de 0 à 10 000 ppmv. Il présente comme avantage d'être non sensible à la pression. Un détecteur électrochimique peut encore être utilisé⁹.

- **PARTICULES** : différentes techniques existent sur le marché. Les normes^{10,17} proposent les mesures gravimétriques après échantillonnage par cyclone et filtre (volume 200 L) ou par échantillonneur de poussières avec filtre (volume 900 L). Les limites de détection sont respectivement de 0,5 mg/m³ et de 0,3 mg/m³. Sont également citées les mesures par compteur de particules à condensation ou encore par instruments de mesure de tailles aérodynamiques (selon le temps de vol et d'accélération)¹⁰. On peut aussi trouver des compteurs de particules optiques à laser¹⁰ ou des compteurs de particules à détection photométrique (Figure 31). Ces derniers permettent une mesure indépendante du débit avec un appareil de faibles poids et taille et à basse consommation d'énergie. Il offre une limite de détection de 2 µg/m³.

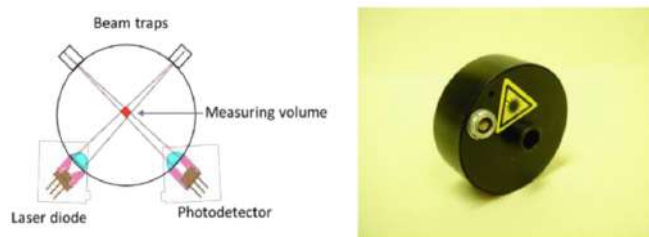


Figure 31- Principe et photo du compteur de particules à détection photométrique (d'après EASA³)

Sur le marché est par exemple proposé le compteur de particules ultrafines TSI Model 825 P-track¹⁶, il s'agit d'un compteur de particules à condensation avec un intervalle d'échantillonnage de 1 seconde et une gamme de détection pour des particules entre 0,02 et 1 µm. Son principal inconvénient réside dans le besoin d'être rechargé en alcool de qualité analytique toutes les 8 heures. Un autre appareil disponible est le compteur de particules FLUKE^{27,91} dont le débit est de 2,83 L/min. Par ailleurs, il n'est pas sensible à la pression jusqu'à 1828 mètres et s'adapte jusqu'à 95% d'humidité. L'ensemble des méthodes d'échantillonnage pour les paramètres généraux est rassemblé dans la figure ci-après (Figure 32).

Paramètres généraux			
CO	CO ₂	O ₃	Particules
Détecteur absorption IR non dispersive - LD : 0,1 ppm Détecteur électrochimique - LD : 0,1 ppm	Détecteur absorption IR non dispersive (TELAIRE 7001 CO₂ monitor) - LD : 0 ppm - <2% ⊕ Pas sensible à la pression Détecteur électrochimique	Détecteur absorption UV - Temps d'échantillonnage : 1 min - LD : 1 ppb Détecteur chimioluminescence - LD : 0,0015 mL/m³ Echantillonneur à choc avec carmin d'indigo et détection spectromètre - LD : 0,0011 mg/m³ Détecteur électrochimique	Mesure gravimétrique après échantillonnage par cyclone et filtre (1) ou échantillonneur de poussières BIA (2) - Volume d'échantillonnage : 200L (1) ou 900L (2) - LD : 0,5 mg/m³ (1) ou 0,3 mg/m³ (2) Compteur de particules à condensation (TSI Model 825 P-track) - Intervalle d'échantillonnage : 1sec - Gamme détection : 0,01-1 µm ⊕ Recharge toutes les 8h Compteur de particules à détection photométrique - LD : 2 µg/m³ ⊕ Taille et poids, basse consommation, indépendance mesure/ débit Compteur de particules FLUKE - Débit: 2,83 L/min ⊕ Indépendance pression, humidité Instruments de mesure de taille aérodynamique

Figure 32- Résumé des méthodes d'échantillonnage pour les paramètres généraux

○ Echantillonnage d'autres composés (Figure 33) :

- **ACIDES** : une combinaison d'adsorbants est en général utilisée (Tenax TA, Carboxen 569, Carbosieve III)³⁰. Le volume d'échantillonnage varie entre 3 et 10 L avec un débit de 20 mL/min, ce qui correspond respectivement à des temps de prélèvement entre 2,5 et 8,3 heures.
- **ACIDE CYANHYDRIQUE** : l'avis de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES)¹⁰⁰ relatif à la qualité de l'air intérieur propose quatre méthodes d'échantillonnage. D'abord un échantillonnage par pompage au travers d'une cassette avec filtre en cellulose de 37 ou 25 mm de diamètre et imprégné de soude. La durée recommandée est de 15 min à 8 h avec un débit de 1 à 2 L/min pour un seuil de détection de 0,2 mg/m³. L'échantillonnage par pompage peut aussi se faire avec un tube rempli de deux plages de chaux. La durée recommandée est de 15 min à 8 h avec un débit de 0,05-0,2 L/min pour un seuil de détection de 1 mg/m³. Deux échantillonnages par barbotage peuvent enfin être utilisés : avec un barboteur rempli soit de soude, soit de potasse. Dans le premier cas, la durée d'échantillonnage est de 60 min avec un débit inférieur à

1 L/min pour un seuil de détection de 0,5 ppm. Dans le second cas, la durée d'échantillonnage est de 10 min à 3 h avec un débit de 0,2 à 1 L/min pour un seuil de détection de 0,6 mg/L.

- **ALCÈNES ET ALCANES** : selon la guideline de l'**ASHRAE**¹⁰, des canisters ou tubes absorbants peuvent être utilisés avant l'analyse GC-MS.

- **ALCOOLS** : une cartouche DNPH sert pour l'échantillonnage avant analyse HPLC⁷⁷.

- **AMINES** : la guideline **ASHRAE**¹⁰ recommande l'utilisation d'un adsorbant solide suivi d'une analyse GC/MS avec détecteur phosphore.

- **DICHLOROMÉTHANE** : la norme **AFNOR**¹⁷ recommande un échantillonnage sur charbon actif, une désorption par disulfure de carbone puis une mesure par CG/FID. Le seuil de détection est de 1,5 mg/m³ pour un volume de 40 L.

- **DIOXYDE DE SOUFRE (SO₂)** : l'étude **ACER** (2013)⁹³ propose un analyseur à fluorescence pulsée.

- **ESTERS** : la guideline **ASHRAE**¹⁰ recommande l'utilisation d'un canister ou d'un adsorbant solide suivi d'une analyse GC/MS.

- **POLYBROMÉS (PBDE)** : il est proposé d'utiliser des tubes en verre avec l'adsorbant XAD-2 encadré de deux sections de mousse de polyuréthane, puis extraction par DCM et analyse GC-MS²⁹. Le débit est de 1,5 à 8,6 L/min.

- **DIOXYDE D'AZOTE (NO₂)** : l'étude **ACER** (2013)⁹³ utilise un analyseur à chimioluminescence.

Acides	Acide cyanhydrique	Alcènes /Alcane	Alcools	Amines
Combinaison d'absorbants - Volume : 3-10 - Débit : 20 mL/min	Filtre en cellulose (soude) - Temps d'échantillonnage : 15 min-8h - LD : 0,2mg/L - Débit : 1-2L/min Tubes de chaux - Temps d'échantillonnage : 15 min-8h - LD : 1mg/m ³ - Débit : 0,05-0,2L/min Barbotage (soude) - Temps d'échantillonnage : 60 min - LD : 0,5 ppm - Débit : <1 L/min Barbotage (potasse) - Temps d'échantillonnage : 10 min-3h - LD : 0,6 mg/L - Débit : 0,2- 1 L/min	Canister Tubes absorbants	Cartouche DNPH	Absorbant solide
DCM	SO ₂	Esters	PBDE	NO ₂
Charbon actif / désorption disulfure	Analyseur à fluorescence pulsée	Canister Absorbant solide	Tubes absorbants XAD2 – mousse de polyuréthane - Débit : 1,5- 8,6 L/min	Analyseur à chimiluminescence

Figure 33- Résumé des méthodes d'échantillonnages des autres molécules

○ Echantillonnage multicomposés :

Le Fraunhofer Institut for Building Physics (IBP)⁸² propose une méthode d'échantillonnage à l'aide d'une mallette complète (Figure 34). Il s'agit d'un concept intégré avec capteurs en temps réel (CO, CO₂ et PID) et pompes et tubes absorbants pour les prélèvements destinés à une analyse en différé. Ce dispositif est relativement coûteux car il comporte de nombreux appareils.

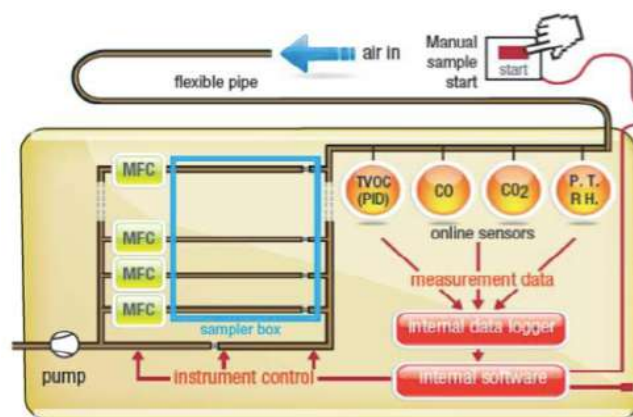


Figure 34- Méthode d'échantillonnage Fraunhofer IBP (d'après Bezold⁸²)

Une figure récapitulative de l'ensemble des méthodes d'échantillonnage citées ci-avant est disponible en annexe (Annexe 19).

3. Contraintes associées à notre objectif

La réalisation d'une campagne de prélèvements en milieu aéronautique engendre un certain nombre de contraintes liées à la spécificité du milieu, en plus des contraintes techniques des moyens analytiques.

Le projet AviSan présenté ci-avant comporte un volet explogique avec une campagne de prélèvements ciblant spécifiquement les « fume events ». Au niveau technique, il s'agit donc de réaliser l'analyse de l'air prélevé sur un court pas de temps. Il concerne surtout les additifs organophosphorés des huiles à savoir les isomères du TCP, du trixylyl phosphate (TXP) et le TBP en raison de l'orientation neurotoxicité qui a été donnée. Ces prélèvements sont réalisés uniquement en cas de « fume event » pour quantifier les polluants lors d'évènements majeurs de contamination de l'air : ces évènements sont par nature non prévisibles et ne peuvent donc reposer que sur le personnel déjà à bord. Une fois déclenchés, les appareils doivent disposer d'une autonomie de fonctionnement suffisante pour couvrir un temps de prélèvement d'environ 1 h mais une quantité d'air adaptée aux limites de quantification souhaitées. Ce temps de prélèvement reste relativement court. En effet, en cas d'événement grave, il est nécessaire de pouvoir réagir rapidement. Une interruption du vol peut même avoir lieu. Le 3 Août 2017, un Boeing 747-8I de la compagnie Lufthansa a par exemple dû retourner à l'aéroport après 35 minutes de vol en raison d'une odeur forte et insupportable¹⁰¹. Les appareils et méthode utilisés doivent garantir une sensibilité de détection ainsi qu'une bonne précision pour la recherche des polluants majoritairement mis en évidence dans les publications antérieures, en cabine ou lors de la pyrolyse des huiles, en rapport avec l'objectif poursuivi. Enfin, il faut utiliser des moyens d'échantillonnage avec lesquels les laboratoires associés au projet ont l'habitude de travailler et pour lesquels ils disposent des appareils d'analyse adéquats.

Pour une utilisation en vol, la compatibilité aéronautique (notamment les interférences électromagnétiques et l'inflammabilité/explosivité) doit être testée pour se conformer aux exigences du milieu. L'empreinte logistique n'est pas négligeable car une telle campagne de prélèvements ne peut être envisagée au détriment du nombre de passagers. Le poids et l'encombrement doivent donc être minimisés. Différents paramètres doivent par ailleurs être testés pour garantir la qualité des mesures : reproductibilité du débit d'échantillonnage malgré les variations de pression, variation de ce débit selon l'état de la batterie, influence de l'altitude. De plus, l'étude prévoit la mise à contribution des personnels embarqués pour faire

les mesures en cas de « fume events ». Il est donc nécessaire d'avoir un matériel simple d'utilisation. Par ailleurs, le matériel est mis en place dans l'avion et n'est utilisé qu'en cas d'événement de contamination de l'air. Il a donc été privilégié un système sans batterie rechargeable car celle-ci peut rapidement se décharger et rendre le dispositif inutilisable en cas de « fume event ». Les appareils à piles ou manuels sont donc privilégiés.

En conclusion, l'ensemble de ces contraintes nécessite des moyens d'échantillonnage rapides et faciles à utiliser par du personnel peu formé en cas de survenue d'événements de contamination de l'air, suffisamment sensibles pour détecter les polluants aux niveaux de concentration habituels, tout en exigeant un temps de prélèvement court. Enfin, l'item du coût ne peut être négligé dans le cadre d'une campagne de mesures à grande échelle (a priori plus de 200 kits d'échantillonnage pour équiper toute la flotte).

4. Proposition de moyens de mesure adaptés à notre objectif

Dans la campagne de prélèvements envisagée, il s'agit d'échantillonner lors de « fume events ». Pour ce faire, l'implication du personnel navigant requiert des méthodes simples et rapides à mettre en œuvre comme décrit dans la partie ci-dessus. Un juste compromis est nécessaire entre des méthodes d'échantillonnages très spécifiques et donc nombreuses et des méthodes plus générales pour une large gamme de polluants mais pouvant être moins sensibles.

En premier lieu, il semble important de faire une mesure des paramètres généraux, comme le taux d'O₂, de CO₂ et de CO. Pour cela, un prélèvement d'air total est nécessaire : une **seringue à gaz étanche** peut être utilisée selon l'expérience du Laboratoire d'analyse, de surveillance et d'expertise de la Marine (LASEM) de Toulon qui utilise ce moyen pour l'air de plongée¹⁰². Simple et rapide d'utilisation, sans interférence avec les systèmes aéronautiques, elle correspond bien aux critères énoncés. La taille de celle-ci, conditionnant le volume d'échantillonnage et la limite de détection, devra être définie en fonction des capacités analytiques des laboratoires impliqués : avec un échantillon d'air de 100 mL le LASEM peut réaliser les analyses de manière confortable. Le nombre de particules dans l'air reste peu étudié à ce jour. Bien qu'il s'agisse d'un paramètre intéressant, le coût d'un **compteur à particules**, en particulier fonctionnant à pile, ne permet pas d'envisager d'utiliser un tel appareil dans une étude à large échelle, en l'état actuel des développements technologiques.

En raison de la toxicité des organophosphorés, une attention particulière doit être portée dans les moyens de prélèvements les concernant. Pour en échantillonner la totalité, la combinaison filtre + adsorbant est efficace. L'échantillonneur de van Netten semble bien adapté. En effet, il a été testé vis-à-vis des critères énoncés ci-dessus (3. Contraintes associées à notre objectif) et a prouvé son adéquation pour la détection du TCP, ciblé plus particulièrement. En outre, il est encore commercialement disponible, contrairement au dispositif proposé par Solbu par exemple. Il est plus judicieux de choisir le **filtre QMA**, comme expliqué dans la partie 4.2. Ce dispositif, rapide et facile à mettre en œuvre, permet de plus de collecter les autres composés organiques non-volatils : au moyen d'une analyse par GC/MS optimisée suite à la récupération du filtre, une large gamme de composés semi-volatils doit pouvoir être mesurée, à concentration pertinente (développement méthodologique en cours). En ce qui concerne les composés organiques volatils, le tube adsorbant est la méthode la plus décrite dans la littérature, en particulier les tubes à support polymérique comme le **tube Tenax TA**. Ces

tubes permettent une détection assez large d'autres composés comme les acides, alcanes, alcènes et alcools, esters et amines. Ce tube peut aussi être utilisé pour l'échantillonnage des HAP volatils ou des hydrocarbures halogénés. Enfin pour les aldéhydes le **tube DNPH** est recommandé : idéalement pour limiter la contamination hors prélèvement il conviendra de privilégier des tubes en verre fermés et une conservation à température ambiante. L'ensemble de ces tubes doit être couplé à une pompe pour permettre le prélèvement d'un volume d'air donné. Pour garantir la fiabilité du matériel dans le temps, les pompes à batterie sont à proscrire comme indiqué plus haut. La pompe Accuro (Draeger®) de 100 mL est donc une solution appropriée puisqu'elle fonctionne manuellement. Les pompes individuelles à piles restent également en état de fonctionnement pendant une longue période de temps, sans risque de décharge, mais elles n'ont pas été retenues pour des raisons de coût dans le cadre de la campagne à grande échelle envisagée (coût unitaire d'environ 1000€).

Aucun moyen de mesure n'est envisagé pour les pesticides car il s'agit surtout de moyens de mesure à long terme donc a priori non pertinents dans l'étude projetée. Par ailleurs, les filtres HEPA de cabine ne sont pas inclus non plus. Même s'ils présentent une facilité d'utilisation, ils reflètent également une exposition à long terme qu'il est difficile de relier à un « fume event » très ponctuel.

○ Adéquation entre la sensibilité des moyens proposés et les concentrations attendues :

Pour valider a priori les méthodes d'échantillonnage proposées ci-avant, il est nécessaire de confronter leur sensibilité, traduite par leur limite de détection, et les niveaux de concentrations rapportés dans les cabines. La sensibilité des méthodes découle du volume d'air prélevé et de la technique analytique employée par la suite. Dans cette partie, nous nous restreindrons à l'étude des volumes d'échantillonnage, dans la mesure où la technique analytique est fixée par le laboratoire en partenariat sur le projet (LASEM). Les volumes de prélèvements envisagés avec la pompe Draeger et la seringue résultent donc d'un compromis entre temps de prélèvement et sensibilité suffisante. Une seringue de 100 mL pour les gaz et 5 L prélevés à travers les tubes adsorbants par 50 coups de pompe sont proposés. La bonne adéquation entre la limite de détection ainsi obtenue et les concentrations de contaminants recherchés doit alors être montrée.

D'une part, les limites de détection théoriques des méthodes peuvent être utilisées. Pour cela, différents recueils de méthodes d'échantillonnage et les sensibilités associées ont été consultés⁹⁷. Les limites de détection rapportées dans ces recueils sont obtenues par

l'application d'une méthode de référence. Il faut donc adapter les valeurs proposées à la méthode réellement appliquée, en particulier en terme de volumes de prélèvements.

D'autre part, ces données peuvent être comparées aux seuils de détection effectivement observés dans la littérature récente. Pour cela, nous identifierons des articles où les temps/volumes de prélèvement sont comparables à ceux anticipés pour l'étude AviSan.

Ce travail est effectué pour une molécule majeure de chacune des familles principalement ciblées pour l'échantillonnage. Le TCP est choisi comme chef de file des organophosphorés, le formaldéhyde pour les aldéhydes et le toluène pour les COV (Tableau 12).

- ORGANOPHOSPHORÉS

Le manuel des méthodes analytiques nord-américain (NIOSH)⁹⁷ propose une limite de détection de 0,05 μg par échantillon pour le ToCP, lors d'un dosage sur filtre. L'étude AviSan cible un volume de prélèvement d'environ 60 L avec l'échantillonneur de van Netten avec filtre de Quartz et un prélèvement de 1h. Ainsi la limite de détection théorique attendue est-elle de 0,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ soit environ 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Les campagnes de prélèvement réalisées montrent en général des niveaux de concentrations faibles pour les organophosphorés. De nombreux composés sont retrouvés à des taux inférieurs à la limite de détection ou $< 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bien que des concentrations plus élevées soient parfois obtenues. Même en cas de « fume event », il est difficile de garantir que la méthode d'échantillonnage proposée soit suffisamment sensible pour la détection des composés en si faible quantité. En raison de l'importance de ces organophosphorés, il est nécessaire de chercher à optimiser leur méthode de détection. Les progrès des sciences analytiques depuis la fiche du NIOSH de 1994 devraient permettre d'optimiser le développement méthodologique afin d'améliorer la sensibilité. L'exemple de la campagne de mesures de l'EASA¹⁰³ illustre ce propos. Le ToCP n'est jamais détecté, mais le TmCP aux propriétés physico-chimiques comparables est mesuré avec une limite de quantification de 0,001 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour un volume de 80 L. Par une optimisation de la méthode, l'étude AviSan peut donc envisager d'atteindre une limite de quantification proche de 0,001 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour un volume de 60 L : à ce niveau de concentration, peu de résultats inférieurs à la limite sont raisonnablement attendus.

- ALDÉHYDES

Le manuel des méthodes analytiques⁹⁷ affiche une limite de détection de 0,07 μg par échantillon pour le formaldéhyde, lors de l'utilisation d'un tube DNPH. L'étude AviSan cible

un volume de prélèvement d'environ 5 L avec la pompe Draeger couplée à un tube DNPH. Ainsi la limite de détection théorique attendue est-elle de $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Au niveau de la bibliographie, un ensemble d'auteurs⁷⁶ s'est spécifiquement intéressé au prélèvement des aldéhydes dans les cabines d'avion avec un tube DNPH. Pour un volume de prélèvement de 40 L, la limite de détection du formaldéhyde obtenue est de $0,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Avec les 5 L envisagés dans le projet AviSan, la limite envisageable serait donc 8 fois plus importante, soit $1,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

La revue bibliographique a montré des concentrations d'aldéhydes principalement comprises entre 1 et $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ lors des campagnes de prélèvements. Lors d'un « fume event », les concentrations attendues sont donc d'un niveau égal ou supérieur. Ainsi les limites de détection assurées par le tube DNPH et la pompe Draeger avec 50 coups de pompe (5 L) sont-elles adaptées aux objectifs du projet AviSan.

Il faut noter cependant que les méthodes plus récentes pour le dosage des aldéhydes préconisent le stockage au froid des tubes DNPH avant et après échantillonnage. L'impératif avant prélèvement se justifie pour éviter une contamination avant utilisation. Celui après échantillonnage vise à éviter toute perte de composés. Dans le cas de l'étude AviSan, un stockage au frais au préalable n'est pas envisageable pour des raisons logistiques. L'utilisation d'un second tube comme témoin permet de prendre en compte ce biais. Une fois le prélèvement effectué, l'échantillon peut être renvoyé au laboratoire, dans le respect de la chaîne du froid. En cas de mise en œuvre non réalisable, une estimation de la perte de composés absorbés peut être réalisée pour corriger les résultats obtenus.

- COMPOSÉS ORGANIQUES VOLATILS

Le manuel des méthodes analytiques⁹⁷ affiche une limite de détection de $0,7 \mu\text{g}$ par échantillon pour le toluène, lors de l'utilisation d'un tube charbon actif. L'étude AviSan cible un volume de prélèvement d'environ 5 L. Ainsi la limite de détection théorique attendue est-elle de $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La méthode d'analyse proposée par ce manuel offre donc une valeur limite trop haute pour détecter correctement les polluants d'un prélèvement dans les cabines. Pour abaisser le seuil de détection, il est possible d'optimiser la méthode proposée. D'une part par l'utilisation d'un tube Tenax, offrant une meilleure désorption lors du traitement de l'échantillon. D'autre part par l'optimisation possible du processus de traitement de l'échantillon en laboratoire.

Cela est mis en œuvre par certains auteurs^{89,90} ayant utilisé une seringue de 50 mL avec un tube Tenax pour effectuer les prélèvements de l'air de la cabine. Le volume d'échantillon disponible pour la mesure des contaminants est en moyenne de 1 L. La limite de détection du toluène ainsi obtenue avoisine 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Avec les 5 L envisagés dans le projet AviSan, la limite envisageable serait donc 5 fois moins importante, soit 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

La revue bibliographique a montré des maximums de concentrations de composés organiques volatiles en général supérieurs à 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ lors des campagnes de prélèvements. Lors d'un « fume event », les concentrations attendues sont donc d'un niveau égal ou supérieur à ces maximums. Ainsi les limites de détection assurées par le tube Tenax et la pompe Draeger avec 50 coups de pompe (5 L) sont-elles adaptées aux objectifs du projet AviSan, à savoir d'échantillonner pendant un événement de contamination de l'air.

Tableau 12- Limites de détection théoriques (NIOSH)

Classe de molécules	Chef de file	LD estimée($\mu\text{g}/\text{ech}$)	Echantillonnage	Débit	Vol ech (L)	LD ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Référence
OP	ToCP	0,05	Van Netten	0,7-0,8 L/min selon les piles (jusqu'à 1,5-1,7)	60	0,8	NIOSH
Aldéhydes	Formaldéhyde	0,07	50 coups de pompe tube DNPH	100mL/coup	5	14,0	NIOSH
COV	Toluène	0,7	50 coups de pompe tube Tenax	100mL/coup	5	140,0	NIOSH

L'objectif ainsi fixé est de détecter les concentrations moyennes présentes dans les avions et reflétant le niveau basal de composition de l'air ambiant. Cette approche ne préjuge pas d'une quelconque toxicité des contaminants à de tels niveaux de concentration mais permet d'assurer la capacité de mesurer toutes concentrations rencontrées en situation anormale. L'optimisation maximale des LD recommandée ci-dessus confère aux méthodes d'échantillonnage une sensibilité au-delà des concentrations proposées comme valeurs limites d'exposition professionnelles (VLEP). A titre d'exemple, la VLEP-8h du ToCP⁹⁸ est de 0,1 mg/m^3 , celle du formaldéhyde¹⁰⁴ s'élève à 0,6 mg/m^3 , celle du toluène¹⁰⁴ à 76,8 mg/m^3 .

- Présentation de la mallette utilisée dans le cadre du projet AviSan (Figure 35) :



Figure 35- Mallette du projet AviSan

Contenu :

- 1 seringue à gaz de 100 mL
- 1 pompe à main Draeger 100 mL (se connecte aux tubes de prélèvements)
- 2 tubes DNPH dont 1 blanc de transport
- 2 tubes à charbon actif dont 1 blanc de transport
- 2 tubes Tenax dont 1 blanc de transport
- 1 échantillonneur van Netten avec filtre en Quartz + filtre témoin

Cette mallette se veut modulaire et adaptable selon la cible de l'étude pour laquelle elle est déployée. Chaque famille de composés peut être associée à un moyen de prélèvement particulier. Ainsi, pour un volet du projet AviSan, seul l'échantillonneur de van Netten sera utilisé puisque l'accent sera volontairement porté sur la potentielle neurotoxicité et donc l'échantillonnage des substances organophosphorées. Par conséquent, l'usage de ce dispositif privilégie le prélèvement des composés organiques non-volatils.

Deux remarques peuvent ensuite être formulées par rapport aux moyens d'analyse proposés ci-avant.

D'une part, les tubes charbons actifs sont ajoutés en plus des tube Tenax TA, retenant déjà une large gamme de composés. Ces deux moyens d'échantillonnage ont un spectre globalement identique mais différent dans le traitement des échantillons. En effet, le tube charbon actif est traité par désorption dans un liquide alors que le tube Tenax subit une désorption thermique. Le traitement du tube Tenax permet de rendre la méthode plus sensible (facteur 10 à 100). Cependant, par conformité aux habitudes du laboratoire impliqué dans les analyses, les deux types de support ont été placés dans la mallette.

D'autre part, chacun des supports de prélèvement est placé en double. L'un des supports est donc utilisé comme blanc pour le transport et le stockage avant et après utilisation du matériel. Ce témoin permet de s'affranchir d'éventuelles contaminations en dehors de l'échantillonnage et de s'assurer ainsi lors de l'analyse, que les composés présents sur les supports proviennent bien du « fume event ». Les tubes absorbants en verre pris comme témoins sont ouverts et bouchés lors de l'échantillonnage. Pour l'appareil de van Netten, avoir un double de l'appareil n'est pas envisageable pour des raisons de coûts, mais une procédure particulière est mise en place pour obtenir un filtre blanc apparié.

Pour une bonne application de ces moyens de mesure par les personnels navigants, une formation préalable est nécessaire. Une sensibilisation initiale au problème du syndrome aérotoxique et en particulier au « fume event » permettrait une meilleure implication des membres d'équipage dans les mesures et les déclarations. Une formation pratique et régulière sur la réalisation de l'échantillonnage est aussi importante pour garantir des prélèvements efficaces lors d'un « fume event ».

DISCUSSION

DISCUSSION

Bien que très commentée, la question du syndrome aérotoxique est souvent abordée de façon unilatérale, en se penchant soit sur les molécules retrouvées dans l'air soit sur les effets de santé. La mise en parallèle et le recoupement des différentes données sont nécessaires pour en approfondir la connaissance et valider d'éventuels liens de causalité. Ceci est illustré par la figure ci-dessous (Figure 36) énumérant quatre angles d'approche à confronter : les incidents de fuite d'huile avec l'analyse des contaminants reportés dans les différents travaux, le problème des moteurs avec une revue des études d'ingénierie, la toxicité des huiles avec l'analyse de leur composition et enfin les problèmes de santé de l'équipage par une étude épidémiologique.

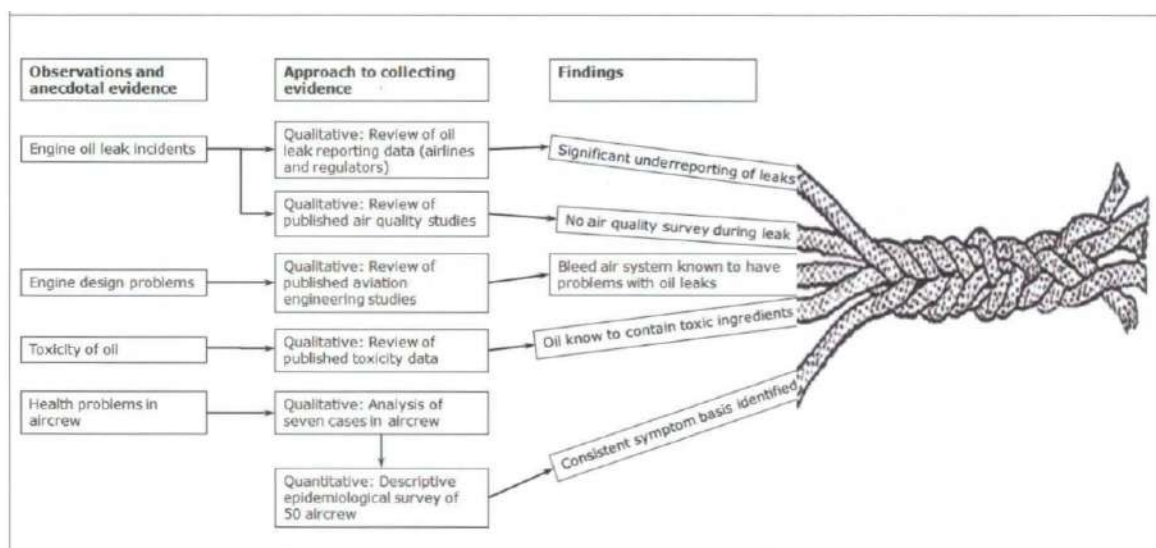


Figure 36- Approches du syndrome aérotoxique (d'après Winder¹³)

Tout d'abord, le problème de sous-déclaration des « fume events » est un frein à la prise de conscience autour du syndrome aérotoxique car l'incidence et la gravité du problème demeurent mal connues. Il semble évident que le système de déclaration actuel est perfectible¹³ pour des raisons variées : manque d'éducation, pression commerciale, découragement face à un problème apparemment insoluble, procédures lourdes, etc. Une meilleure identification et une simplification des canaux de déclaration sont donc nécessaires. Tout d'abord, la proposition d'une échelle commune serait une solution à soutenir. Cela permettrait de faciliter l'analyse des données avec un recueil clair et unique des informations relatives aux « fume events ». Ensuite, une déclaration possible par les passagers pourrait enrichir les bases de données même si elle complexifierait le travail de traitement des

informations. Pour assurer le bon fonctionnement d'un tel système, une sensibilisation au niveau des passagers serait alors nécessaire, les problèmes relatifs à l'air contaminé restant pour l'instant peu connus du grand public. Une base de données internationale et accessible pour reporter les effets indésirables et les « fume events » serait donc un outil précieux pour mieux comprendre la diversité des manifestations liées à l'air possiblement contaminé. Enfin, une autre alternative serait de développer et d'intégrer à bord des avions des capteurs chimiques détectant la présence des contaminants pour objectiver le « fume event »¹⁴.

Concernant l'étude des effets de santé en découlant potentiellement, la démarche ne peut être restreinte au seul champ du syndrome aérotoxique. Une vision plus globale semble nécessaire notamment de par les similitudes avec les symptômes du syndrome du bâtiment malsain (SBM) ou « sick building syndrom » (SBS). Pour des niveaux de concentration du même ordre de grandeur que ceux habituellement rapportés dans les avions, à l'exception des organophosphorés, une symptomatologie identique est relevée, mis à part les effets neurologiques. En ce qui concerne les publications actuellement disponibles, ces composés sont donc très largement étudiés. Il est bien sûr nécessaire de les inclure dans les études car le lien avec les effets de santé est plausible. Cependant, à côté de ces derniers, il serait intéressant de se pencher vers de nouvelles classes moins étudiées. La gamme de recherche mérite d'être étendue vers les acides, les phtalates, les siloxanes et dans une moindre mesure vers les composés halogénés. Peu de données sont disponibles sur ces types de contaminants, dont certains très odorants et pouvant expliquer les odeurs ressenties (acides carboxyliques). De la même façon, peu de travaux sont disponibles sur la gamme complète des aldéhydes, malgré qu'ils soient mesurés à de hautes concentrations dans les études de simulation ou en vol. Même si une toxicité majeure n'est pas mise en évidence, il ne faut pas oublier que les personnels sont soumis à une exposition répétée, susceptible d'entraîner des symptômes différents des intoxications aiguës. Par ailleurs, tous les paramètres généraux de qualité de l'air font l'objet de peu de publications. Pourtant, il pourrait être utile de coupler l'analyse en particulier de l'humidité relative voire du CO, CO₂, O₃, O₂ (pression partielle) et des particules fines à celle des autres polluants. Ils peuvent à eux-seuls provoquer des symptômes en fonction de leur concentration ou bien exacerber ceux liés à de certaines substances.

De façon à mieux caractériser les « fume events » en tant que tel, il est indispensable de cibler les échantillonnages sur ces événements. Pendant ces derniers, les concentrations pourraient atteindre des niveaux plus importants, entraînant un risque supérieur pour la santé. Il s'agit donc de travailler à de nouvelles investigations ciblant le bon moment, les bons polluants et avec des méthodes d'échantillonnage adaptées à cet objectif : le travail présenté constitue un

apport à la réflexion métrologique. sa mallette de prélèvement décrite ci-avant permet d'échantillonner en cas de « fume event », en ciblant la majorité des molécules potentiellement incriminées dans le syndrome aérotoxique. L'inclusion d'une seringue et d'une pompe Draeger lui confère une relative polyvalence. En effet, une large gamme commerciale de tubes colorimétriques permet d'élargir la gamme de composés ciblés sur la pompe, avec par exemple la mesure de l'humidité ou de l'ozone. L'avancée des connaissances scientifiques pourra donc être suivie d'une évolution à moindre coût de la mallette de prélèvement. Pour cibler au mieux un « fume event », des systèmes de surveillance de la qualité de l'air en temps réel peuvent être proposés. En mesurant des marqueurs adéquats de contamination de l'air, ils permettraient d'alerter l'équipage pour déclencher des prélèvements, mais également pour prendre toute mesure imposée par la sécurité des vols (isolement de l'équipement, maintenance préventive de l'appareil etc.)

Par ailleurs, la pression et l'humidité sont des facteurs qui pourraient modifier les effets de certains toxiques et ne sont pas pris en compte dans les études toxicologiques servant de base à l'identification des dangers ou pour la fixation des valeurs limites. Par exemple, la pression relative pourrait co-agir sur la fonction respiratoire avec des polluants comme le CO et le CO₂ ou l'humidité relative faible pourrait exacerber le caractère irritant de polluants comme les aldéhydes. L'effet de l'interaction entre les effets toxiques des composés volatils ou semi-volatils avec la pression et l'humidité relatives n'est pas décrit de manière systématique. Pour cette raison, les seuils acceptables actuellement disponibles pourraient justifier une adaptation pour certains polluants afin de s'appliquer aux membres d'équipage. Au-delà ces seuils d'exposition doivent aussi prendre en compte les passagers les plus faibles comme les jeunes, les femmes enceintes et les fœtus, les groupes à risque (maladies chroniques, immunodéprimés, susceptibilités individuelles etc.).

Par ailleurs, même pour les professionnels, l'étude des effets des effluents de moteur ne doit pas se limiter aux seuls membres d'équipage. Certains auteurs se sont déjà penchés sur l'exposition des personnels au sol comme les techniciens ou les chargeurs de bagages^{22,85,105}. Les résultats ont montré des expositions égales et souvent bien supérieures à celles dans les cabines d'avions. Il serait donc judicieux d'élargir le champ des recherches à ces personnels lors de campagnes ultérieures.

Des solutions techniques pouvant améliorer le problème du syndrome aérotoxique existent. Il est par exemple possible de réduire les émissions toxiques au sein de la cabine. En effet, l'air intérieur contribue jusqu'à 90% à la concentration totale de composés organiques volatils⁶⁶.

Des changements de matériaux utilisés notamment les ignifugeants peuvent être envisagés.

Au niveau des huiles utilisées, une évaluation fiable de la toxicité est indispensable, surtout par voie inhalée et en prenant en compte les produits secondaires de pyrolyse. Le TCP pourrait être remplacé par des substances moins toxiques dans les moteurs où est prélevé le « bleed air ». Par ailleurs, des systèmes de filtration efficaces de cet air de prélèvement peuvent être envisagés pour réduire les concentrations de contaminants pénétrant dans la cabine. Une étude¹² propose en ce sens un filtre basé sur une oxydation nano-catalytique et qui permettrait, en plus de tuer bactéries et virus, d'éliminer les COV. Enfin, le nouveau Boeing 787 (B787) « Dreamliner » apporte peut-être sur le marché une nouvelle technologie remédiant au problème de contamination par les huiles moteur^{3,11,13,75,106}. La cabine est approvisionnée par le biais d'un système de compresseur électrique, puisant l'air frais directement à l'extérieur. De plus, l'avion est pressurisé à 6000 pieds contre habituellement 8000, apportant ainsi un meilleur confort aux passagers et évitant les hypoxies chez les sujets avec des troubles respiratoires. Bien que ce B787 soit présenté dans les médias comme LA solution, aucune preuve n'a été apportée, de par l'absence de mesures disponibles et la non-reconnaissance scientifique du syndrome⁹. Des travaux en ce sens restent donc à mener.

CONCLUSION

CONCLUSION

THESE SOUTENUE PAR : Marie-Lorraine BOSSARD

Par une large revue bibliographique, ce travail permet un aperçu global de l'état des connaissances en lien avec le syndrome aérotoxique, introduit par Hoffman, Winder et Balouet en 1999. Les symptômes rapportés sont nombreux, à court ou à long terme, et peuvent être respiratoires, neurologiques, systémiques, psychiatriques ou dermatologiques. Le lien direct entre ces effets de santé et la contamination de l'air n'est pas clairement établi à ce jour mais ce lien est complexe à démontrer. Le fonctionnement de l'alimentation en air des cabines d'avion et plus largement les produits utilisés et les activités réalisées en son sein, permettent de cibler les différentes sources de pollution à investiguer. Avec une fréquence s'échelonnant entre 1 pour 100 à 1 pour 10 000 vols, il est difficile de saisir des « fume events » ou événements massifs de contamination de l'air par les moteurs et d'identifier les molécules présentes, et par suite de décider de leur imputabilité dans la survenue des effets sanitaires décrits. Une large gamme de méthodes d'échantillonnage est proposée dans la littérature scientifique et mise en œuvre dans les différentes études réalisées à ce jour. Ces travaux n'ont pas consacré un égal intérêt à l'ensemble des contaminants identifiés et potentiellement présents. Alors que les organophosphorés, considérés comme les plus toxiques, sont largement étudiés, des lacunes persistent en ce qui concerne les acides carboxyliques, les phtalates, les siloxanes ou les paramètres plus généraux comme les particules, l'ozone, le dioxyde de carbone ou le monoxyde de carbone. Une prise en compte des particularités aéronautiques comme le bas taux d'humidité et la pression relative faible peut être aussi suggérée pour le volet toxicologique.

Dans le but de mettre en œuvre une campagne de prélèvements sur des « fume events », réalisés par les personnels embarqués eux-mêmes, des moyens simples, rapides et efficaces sont nécessaires. Pour échantillonner la majeure partie des contaminants présents, plusieurs moyens sont proposés dans ce travail. Un prélèvement d'air total est envisagé avec une seringue pour mesurer les paramètres généraux. À celui-ci s'ajoute des prélèvements sur filtre avec l'échantillonneur de van Netten, ciblant les composés organiques semi-volatils, en particulier les isomères du Tricresyl Phosphate. Pour les composés organiques volatils, le tube adsorbant type Tenax TA est le plus approprié par la large gamme de molécules qu'il peut échantillonner. De façon plus spécifique le tube DNPH est privilégié pour l'échantillonnage

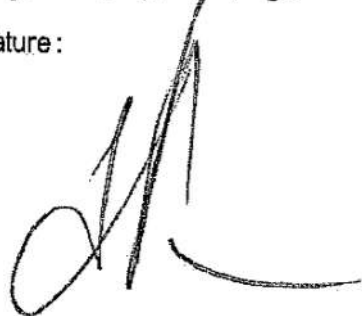
des aldéhydes. En outre, la pompe calibrée peut être associée à divers tubes colorimétriques ou supports adsorbants complémentaires, disponibles sur le marché, permettant d'envisager une évolution de la mallette, si de nouveaux besoins apparaissent avec l'avancée des connaissances scientifiques sur les causes du syndrome aérotoxique. Dans tous les cas, des prélèvements manuels sont possibles afin de s'affranchir des contraintes d'alimentation électrique des appareils de prélèvement. Ces matériels d'échantillonnage permettront d'obtenir des informations précises sur la composition de l'air lors d'un « fume event » grâce à la formation en amont des membres d'équipage à leur utilisation. Les travaux ultérieurs devront aussi se pencher sur les personnels au sol, qui sont amenés à être exposés dans leur travail. A long terme enfin, l'ensemble des données récoltées devra être confronté à des valeurs limites d'exposition adaptées au milieu aéronautique et prenant en compte l'ensemble des passagers transportés.

Le Président de la thèse,

Nom :

J. GILBERTON

Signature :



Vu et permis d'imprimer, Lyon, le

Vu, la Directrice de l'Institut des Sciences Pharmaceutiques et Biologiques, Faculté de Pharmacie

13 NOV. 2017

Pour le Président de l'Université Claude Bernard Lyon 1,



Professeure C. VINCIGUERRA

ANNEXES

ANNEXES

Annexe 1 – Origine des différents polluants (1)

Molécules	CAS	Sources	Humain	Moteur	Matériaux	Alimentation	Produits d'entretien/ Cosmétiques	Bactéries
1-hexanol-2-ethyl	104-76-7	Matériels		X				
1,1,1-trichloroethane (methyl chloroforme)	71-55-6	Dégraissant des métaux, huile lubrifiante, solvant pour cires et résines naturelles, métabolite humain mineur	X	X			X	
1,1,2-trichloroethane	79-00-5	Solvant					X	
1,1,2,2-tetrachloroethane	79-34-5	Intermédiaire chimique, solvant, peintures, pesticides					X	X
1,2-dibromoethane (ethylene dibromide)	106-93-4	Ancien additif dans les essences au plomb	X					
1,2-dichloroethane	107-06-2	Solvant					X	
1,2-dichloroethene	79-01-6	Production de PVC, dans le passé solvant		X				
1,4-dichlorobenzene	106-46-7	Déodorant, désodorisant, insecticide					X	X
2-butanone	78-93-3	Rejet de moteur, carburants, solvants, produits de nettoyage, peintures, caoutchouc, résines acryliques et vinyliques, huiles lubrifiantes, métabolite humain mineur	X	X			X	
2-butoxy-ethanol (ethylene glycol monobutyl ether)	111-76-2	Produits de nettoyage, linoléum, caoutchouc		X			X	
2-hexanone	591-78-6	Activités industrielles: pâte à bois, opérations sur charbon et schiste		X				
2-Propanol	67-63-0	Solvant pour résine, aérosols, antigel, adhésif pour tapis, peinture au latex, calfeutrage, solvants pour boissons aromatisées, métabolite humain mineur	X	X	X		X	
2,5-dimethylbenzaldehyde	5779-94-2	Huiles moteurs, fournitures, mousses d'isolation, air expiré	X	X	X			
4-OPA : 4-oxopentanal	626-96-0	Réaction ozone/squalène	X					
6-MHO : 6-methyl-5-hepten-2-one	110-93-0	Réaction ozone/lipides de la peau	X					
Acetaldehyde	75-07-0	Huiles moteurs, fournitures, mousses d'isolation, air expiré, résines synthétiques, plastifiants	X	X	X			
Acetone	67-64-1	Bioeffluents, réaction ozone/lipides de la peau, produits de consommation, déodorant, kerosène, rejet du moteur, essence, huiles lubrifiantes, produits avec bois aggloméré, stratifiés en plastique, linoléum, tapis, produit de décomposition	X	X	X	X	X	
Acetonitrile methyl cyanide	75-05-8	Rejet de véhicule, fumée de tabac, combustion de produits organiques, solvant, pesticides, dissolvant, parfums, vernis sol, imperméabilisant, antistatique, détergent, adoucisseurs d'eau, azurants pour métaux, fabrication de films photographiques, réactif de laboratoire		X	X		X	X
Acide acetique	64-19-7	Réaction ozone/lipides de la peau	X					
Acroleine	107-02-8	Huiles moteurs, fournitures, mousses d'isolation, air expiré, rejet moteur, herbicide aquatique et algicide dans les canaux d'irrigation, microbiocide dans les puits de pétrole, combustibles liquides, eau de refroidissement, traitement des eaux usées, combustion	X	X	X			
Bactéries, virus et moisissures		Occupants, air extérieur	X					
BDE 183	PBDE: 32534-81-9	Retardateur de flamme : tapis, sièges, intérieur de cabine		X				
BDE 209	PBDE: 32534-81-9	Retardateur de flamme : tapis, sièges, intérieur de cabine		X				
BDE 47	PBDE: 32534-81-9	Retardateur de flamme : tapis, sièges, intérieur de cabine		X				
BDE 99 et BDE 100	PBDE: 32534-81-9	Retardateur de flamme : tapis, sièges, intérieur de cabine		X				
BDPP	57583-54-7	Huiles moteurs, fluides hydrauliques : anti-usure et additif fire-retardant, anti-corrosion et lubrifiant		X				
Benzaldehyde	100-52-7	Huiles moteurs, fournitures, mousses d'isolation, air expiré, échappement moteur, aliments, sol en caoutchouc vinylique, cosmétiques et parfums	X	X	X		X	
Benzene	71-43-2	Carburant, huile, gaz naturel, tapis, adhésif, produit de nettoyage, solvant, peinture, revêtement de sol en vinyle		X	X		X	
Bromodichloromethane	75-27-4	Sous produit quand ajout de chlore dans l'eau, solvant après dégazement et fire-retardant					X	
Butanal	123-72-8	Produit de combustion incomplète, panneaux de fibres, panneaux de particules, revêtement de sol, produit de nettoyage, solvant dans l'industrie du papier, métabolite humain mineur, fabrication de parfums	X		X		X	
Capronaldehyde (hexanal)	66-25-1	Huiles moteurs, fournitures, mousses d'isolation, air expiré, bois aggloméré, linoléum, moisissure, métabolite humain, produits de nettoyage, produits de combustion, réaction ozone/ lipides de la peau	X	X	X		X	
Chlorobenzene	108-90-7	Pesticide organochloré dans le passé, solvant						X
Chloroforme (trichloromethane)	67-66-3	Métabolite humain mineur, formé par la chloration de l'eau	X					X
Cis-1,3-dichloropropene (perchloroethylene)	10061-01-5	Solvant pour nettoyage à sec, dégraissant pour métaux, traitement des textiles, solvant, produits de nettoyage, fluidisation des liquides et des gaz dans les transformateurs électriques, métabolite humain mineur	X	X				X
Crotonaldehyde	4170-30-3	Huiles moteurs, fournitures, mousses d'isolation, air expiré, rejet moteur, incinération de déchet, combustion bois, essence, diesel, désinfectants, caoutchoucs, plastiques	X	X	X		X	
Cyanure d'hydrogène	74-90-8	Pyrolyse ou combustion de composés contenant de l'azote en condition de déficit en O2, rodenticide		X				
DBPP: dibutylphenylposphate	2528-36-1	Huiles (aérosol), fluides hydrauliques : anti-usure et additif retardeur de flamme, anti-corrosion et lubrifiant		X				
Decamethylcyclopentasiloxane	541-02-6	Solvant, lubrifiant, huile, produits de nettoyage, produits de soins, traitement de surface		X	X		X	
Dibromochlorometane	124-48-1	Sous produit quand ajout de chlore dans l'eau, par le passé solvant et fire-retardant					X	
DODPA: dioctyldiphenylamine	101-67-7	Huiles moteur		X				
Endotoxines		Occupants, bactéries	X					
Ethanol	64-17-5	Bioeffluents, consommation boissons alcoolisées, champignons, fermentation, produits de soin, solvants, désinfectants, peintures au latex, produits de nettoyage, essence sans plomb, désodorisant, calfeutrage	X	X	X	X	X	
Ethylbenzene	100-41-4	Produits de nettoyage, tapis, sous-tapis, carreaux de plafond, machines de bureau, essence diesel, essence, huiles lubrifiantes, peintures, mobilier avec fini laqué, produit de combustion		X	X		X	
Fibres de carbone et nanotubes		Combustion de polymères de la structure de l'avion		X				
Formaldéhyde	50-00-0	Huiles moteurs, fournitures, mousses d'isolation, air expiré, échappement moteur, combustion incomplète de substances organiques, finitions en bois, adhésifs, panneaux de particules	X	X	X			
Gaz carbonique CO2	124-38-9	Respiration, glace sèche alimentaire, produit de combustion	X	X		X		
Geranyl acetone	689-67-8	Réaction ozone/squalène	X					
INSECTICIDES: prallethrin allethrin tetramethrin resmethrin phenothrin permethrin cypermethrin - beta esfenvalerate bifenthrin cyfluthrin cyhalothrin deltamethrin		Insecticides						X

Annexe 1 – Origine des différents polluants (2)

Molécules	CAS	Sources	Humain	Moteur	Matériaux	Alimentation	Produits d'entretien/ Cosmétiques	Biocides
Isoprène	78-79-5	Bioeffluent humain (respiration)	X					
Isovaleraldehyde	590-86-3	Huiles moteurs, fournitures, mousses d'isolation, air expiré	X	X	X			
Limonene	5989-27-5	Produits naturels (bois, agrumes, parfum des cosmétiques et produits de nettoyage), nettoyants, désodorisants, lubrifiants, déodorants, adhésifs, caoutchouc			X		X	
m-tolualdehyde	620-23-5	Huiles moteurs, fournitures, mousses d'isolation, air expiré	X	X	X			
m-xylene	108-38-3	Encre, adhésif, solvants de nettoyage, carburants à base de pétrole, solvant aromatique, photocopie, huile de chauffage, huile diesel, huile lubrifiante, solvants, peintures, produits de nettoyage, laque, adhésifs, caoutchouc, sol en caoutchouc vinylique, essence		X	X		X	
Menthol	89-78-1	Nettoyage					X	
Methanol	67-56-1	Nourriture			X			
Methyl butyl cetone (4-methylpentan-2-one)	108-10-1	Solvant					X	
Monoxyde de carbone CO	630-08-0	Gaz d'échappement des véhicules d'entretien au sol, produit de décomposition thermique de l'huile synthétique / fluides hydrauliques		X				
n-butyraldehyde	123-72-8	Huiles moteurs, fournitures, mousses d'isolation, air expiré	X	X	X			
n-Hexane	110-54-3	Adhésif, solvant, peinture, produits de nettoyage, huiles et graisses, métabolite humain mineur	X	X	X		X	
n-undecane	1120-21-4	Composant du pétrole, du diesel, de l'essence, tapis, sous tapis, colles, peintures, revêtements, adhésifs, produits de nettoyage, métabolite humain mineur	X	X	X		X	
Nonanal	124-19-6	Peintures, parfums, détergents, Réaction ozone/lipides de la peau	X		X		X	
o-Tolualdehyde	529-20-4	Huiles moteurs, fournitures, mousses d'isolation, air expiré	X	X	X			
o-xylene	95-47-6	Produit de combustion		X				
Oxydes d'azote		Emission de fuels, combustion de l'air à haute pression		X				
Ozone	10028-15-6	Occupants (huile de la peau), moquettes, sièges, filtres à air sale, atmosphère	X	X				
p-tolualdehyde	104-87-0	Huiles moteurs, fournitures, mousses d'isolation, air expiré	X	X	X			
p-xylene	106-42-3	Encre, adhésif, solvants de nettoyage, carburants à base de pétrole, solvant aromatique, photocopie, huile de chauffage, huile diesel, huile lubrifiante, solvants, peintures, produits de nettoyage, laque, adhésifs, caoutchouc, sol en caoutchouc vinylique, essence		X	X		X	
PAN: Phenyl-alpha-naphtylamine	90-30-2	Huiles moteurs		X				
Particules ultrafines		Roulage, cuisine, repas, réactions chimiques, air extérieur non filtré			X			
Pentanal (n-pentanal, n-valeraldehyde)	110-62-3	Additif des huiles, rejet des moteurs		X				
PM10		Occupants, denrées alimentaires, poussières accumulées, matériel lainé (tapis, sièges)	X	X	X			
PM2,5		Occupants, denrées alimentaires, poussières accumulées, matériel lainé (tapis, sièges)	X	X	X			
Propanal (2-methylacrolein, isobutenak, methacrylaldehyde, methacrylic aldehyde, 2-methyl-2-propenal)		Rejet des moteurs		X				
Propylene glycol	57-55-6	Huiles moteurs, polyester et résine alkyde, peintures et revêtements, antigel, liquides de refroidissement, plastifiants, détergents domestiques, décapant d'avion, fumée artificielle, alimentation, médicaments, produits de soin (cosmétiques)		X	X	X	X	
Styrene	100-42-5	Caoutchouc, plastique, isolation, tapis, sous tapis, machines de bureau, produit de combustion		X	X			
TBP	126-73-8	Fluide hydraulique, Huiles moteurs, équipements électroniques : anti-usure et additif retardeur de flamme, anti-corrosion et lubrifiant		X	X			
TCE: tetrachloroethylene	127-18-4	Ancien solvant des produits de nettoyage et dégraissant					X	
TCP: tricesyl phosphate	1330-78-5	Huiles moteur(aérosol), additif anti-usure et retardeur de flamme, anti-corrosion et lubrifiant, plastifiant		X	X			
Tetrachloromethane (carbon tetrachloride)	56-23-5	Propulseur dans les aérosols, démaquillant, dégraissant pour métaux, réfrigérant, solvant pour huiles, graisse, vernis, caoutchouc, résine, agent de nettoyage à sec, extincteur d'incendie, intermédiaire chimique		X	X		X	
TIBP	126-73-8	Lubrifiants, huiles moteurs		X				
TmCO		Huiles moteurs		X				
TnBP: tri-n-butyl phosphate	126-73-8	Lubrifiants, huiles moteurs		X				
ToCP: orto-tricesyl-phosphate	TCP : 1330-78-5	Huiles moteurs		X				
Toluene	108-88-3	Encre, adhésif, solvants de nettoyage, carburants à base de pétrole, huile, diesel, lubrifiant, essence, solvant, produit de combustion, peintures, laque, tapis, sous-tapis, linoléum, revêtement de sol en vinyle, colles, cosmétiques		X	X		X	
TPP	115-86-6	Lubrifiants, huiles moteurs		X				
trans-1,3-dichloropropene	10061-02-6	Solvant					X	
Trialkyl phosphates								
-triphenyl phosphate	115-86-6							
-triisobutyl phosphate	126-73-8							
-tris(2-ethylhexyl)phosphate	78-42-2	Fluide hydraulique, retardeur de flamme pour PVC	X	X				
Trichloroethene	79-01-6	Solvant dégraissant, intermédiaire chimique, solvant de nettoyage, stylo correcteur, adhésif					X	
TVOC		Huiles moteurs		X				
Undecane C11	1120-21-4	Carburant, solvant comme le white spirit, liquide de nettoyage		X			X	
Valeraldehyde	110-62-3	Huiles moteurs, fournitures, mousses d'isolation, air expiré	X	X	X			
Vinyl acetate	108-05-4	Solvant, monomère des plastiques			X			

Annexe 2- Questionnaire d'investigation autour d'un « fume event » (1) (d'après BFU³⁷)

German Federal Bureau of Aircraft Accident Investigation

Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung



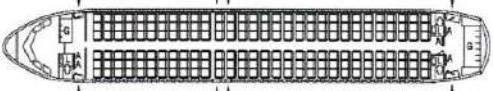
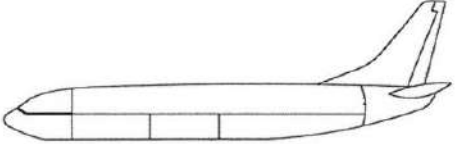
Questionnaire Cabin Air (Initial Interview)

BFU Reg.:

Please complete this questionnaire and return it to the BFU within 24 hours.

Fax-No.: +49 531 3548-246

E-Mail: ops@bfu-web.de

Date of Flight:	Departure Aerodrome:	Arrival Aerodrome:
Flight No:	Registration:	Aircraft Type:
Name:		Functions Aboard:
1. What was observed (smoke and/or smell)? The word smoke also stands for steam or fog.		
☐ Smoke	☐ Smell	☐ Both
Additional Descriptions:		
Where there other observations (indication, sounds, malfunctions, etc.)?		
2. Who has made these observations? ☐ Captain ☐ Co-Pilot ☐ Cabin Crew ☐ Pax		
3. In which area of the airplane were these observations made?		
Flight Deck	Cabin	Cargo Compartment
☐ Cockpit	☐ Upper Deck	☐ FWD
☐ Cockpit Crew Rest	☐ Main Deck	☐ AFT
☐ E&E Compartment	☐ Lower Deck	☐ Bulk
Other:		
 		
4. What did you and/or the crew do immediately prior to the first observation?		
5. In which flight phase did the observation occur?		
☐ Take Off	☐ Climb	☐ Cruise / FL: _____
☐ Approach	☐ Landing	☐ Descent
☐ Taxi	☐ APU Use	
Additional Information (Aircraft configuration, Packs, Bleed):		
6. Which checklist was applied?		

Annexe 2- Questionnaire d'investigation autour d'un « fume event » (2) (d'après BFU³⁷)

BFU Questionnaire Cabin Air (Initial Interview)

7. How intense and what characteristic did the smell/smoke have? How long did it last?		
Minutes:	☐ Increasing	☐ Decreasing
Description of the smell:		
Additional description of the smoke:		
Opacity:	Colour:	Location (above/below):
Additional Information:		
8. Did you experience any impairments? Which and how intense were they?		
1) Irritation (e.g. eyes, nose, throat) - but no impairments	☐	
2) Feeling unwell (e.g. headache, nausea) - but no impairments	☐	
3) Able to perform duties with little difficulty but with reduced efficiency	☐	
4) Able to perform duties with some difficulty and/or mistakes	☐	
5) Able to perform duties but with great difficulties	☐	
6) Unable to perform any duties	☐	
Additional Information:		
9. How many persons were affected?		
Crew:	Passengers:	
10. Did you or other crew members don an oxygen mask?		
☐ Yes	☐ No	
11. Why did your or other crew members don oxygen masks?		
☐ Precautionary	☐ Necessary, because: ☐ Procedure (QRH etc.) and/or ☐ Immediate Hazards	
If there were "immediate hazards" please describe:		
12. Will you have a medical examination done?		
☐ Yes	☐ No	
When:	Where:	
13. Will you pass on the results of the medical examination to the BFU?		
☐ Yes	☐ No	
14. Cargo (Dangerous Goods List, carry-on luggage, etc.)		
City / Date:	Contact Data (E-Mail, Cell Phone, etc.):	

Annexe 3- Revue de littérature des différents effets de santé rapportés et de leur fréquence

Effets	Busch (2015)	Somers (2005)	Winder et al (2002b)	Harper (2005)	Cox and Michaels (2002)	Michaels (2003)	Coxon (2002)	Montgomery et al. (1977)	Mackenzie Rose et al (2006)	Heuser et al (2005)	Van Notten (1998)	Schwarzer et al. (2014)	Murawski et al. (2011)	Winer and Balouet (2001)	Van Notten (2005)	Abou-Donia et al. (2013)	OHRECA (2014)	German Federal Bureau of Aircraft Accident Investigation (2014)	Mackenzie Rose (2008)	Global Cabin Air Quality Executive (2010)	Hecker et al. (2014)	McNeely et al. (2014)	Lidgren and Norbäck (2005)	Winder and Michaels (2005)
RESPIRATOIRE			X(22%)						X				X		X		X (17%)		X					
Toux													X							X	X		X (4%)	X
Respiration courte					X									X						X	X	X (15,5%)		X
Oppression thoracique									X					X					X	X	X			X
Respiration sifflante																				X	X			
Irritation des yeux, du nez ou de throat		X	X (58-76%)	X	X	X			X		X			X				X	X		X		X (11-15%)	X
Bronchite chroniques et maladies respiratoires																						X		X
NEUROLOGIQUE	X	X	X (86%)	X	X	X		X		X (58%)	X		X	X			X (17%)	X	X	X	X	X (23%)	X (6%)	X
Maux de tête		X		X					X										X	X				
Ralentissement réflexion mentale		X							X	X		X				X (62%)			X	X				
Difficulté multi-tâches, incoordination					X			X	X	X									X	X				X
Problème de mémoire		X			X	X							X	X		X (78%)			X	X	X	X (15%)		X
Problème de parole		X					X	X					X	X					X	X				
Difficulté de concentration		X		X									X	X					X	X	X	X (15%)	X (1%)	X
Changement visuel				X										X					X	X	X			X
Tremblement														X				X	X	X	X			X
Paresthésie, engourdissement									X					X					X	X	X	X (17%)		X
Problème d'équilibre										X				X			X (35%)		X	X	X			
Vertiges			X (72%)				X			X									X	X	X			X
Désorientation		X	X (72%)		X			X	X		X		X	X				X	X	X	X			X
Sentiment d'intoxication, d'être drogué													X						X					X
SYSTEMIQUE																								
Nausées, vomissements	X	X	X (58%)	X (10%)		X		X	X		X	X	X	X	X			X	X	X	X		X (0,6%)	X
Fatigue, épuisement, léthargie	X	X	X (78%)	X (14%)		X		X	X					X		X (53%)			X	X	X	X (37%)	X (21%)	X
Faiblesse et douleurs musculaire				X (3%)												X (42%)	X (33%)		X	X	X	X (16%)		X
Palpitations, problème cardio-vasculaire														X			X		X	X	X	X		X
Diarrhées				X (10%)		X			X					X	X				X	X	X			X
Dysarthrie								X											X	X		X (33%)		X
Signes d'immunosuppression									X										X					X
Cancer (reproductif, peau)																						X		
signes de sensibilité chimique, allergies									X										X			X (39%)		X
PSYCHIATRIQUE																	X (14%)							
Anxiété																					X	X (20%)		
Problème de sommeil																	X		X		X	X (33%)		X
Dépression												X					X		X		X	X (36%)		
PTSD (stress prost traumatique)												X									X			
DERMATOLOGIQUE																								
Rash, Irritation				X (5%)					X					X					X	X	X	X (15%)	X (12%)	
Perte des cheveux									X										X			X (17%)		

Annexe 4- Limites internationales d'exposition pour les organophosphorés (d'après Lamb et al.²¹)

Country	Substance	Tributyl phosphate (all isomers)		Tricresyl phosphate (ortho-isomer)		Dibutyl phenyl phosphate	
		Long term/8hr TWA/ mgm ⁻³	Short term/15 min TWA/ mgm ⁻³	Long term/8hr TWA/ mgm ⁻³	Short term/ 15 min TWA/ mgm ⁻³	Long term/8hr TWA/ mgm ⁻³	Short term/15 min TWA/ mgm ⁻³
Austria		2.5	5	0.1	0.2	3.5	-
Belgium		2.2	-	0.1	-	3.6	-
Canada		2.2	-	0.1	-	3.5	-
Denmark		2.5	5	0.1	0.2	3.5	7
France		2.5	-	0.1	-	-	-
Germany		11	22	-	-	-	-
Hungary		-	-	0.1	-	-	-
Poland		-	-	0.1	0.3	-	-
Singapore		2.2		0.1	-	3.5	-
Spain		2.2		0.1	-	3.6	-
Sweden		-	-	-	-	-	-
Switzerland		2.5	10	0.1	-	-	-
USA-NIOSH		2.5	-	0.1	-	-	-
USA- OSHA		5	-	0.1	-	-	-
United Kingdom		5	5	0.1	0.3	-	-

Annexe 5- Liste des composés retrouvés dans les huiles neuves^{1, 2, 8, 13, 49, 65}

HUILES NEUVES
Aromatiques : HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques)
1-naphtol
2,6-Di-tert-butyl-p-cresol
Aniline
Anthracène
Fluoranthène
Naphtalène
Esters
Alkyl époxy-ester modifié
Nitrogènes
1-Napthylamine
1,1-dinapthylamine
2-Napthylamine
Diphenylamine alkylé
Benzamine, 4-octyl-N-(4-octylphenyl)
Benzenamine, N-phenyl-, produits de reaction avec 2,4,4-trimethylpentene
Dioctyldiphenylamine
Diphenylamine alkylé
N-phenyl-1-naphthylamine (PAN)
N-phenyl-2-naphthylamine
Organophosphorés
Butyl diphenyl phosphate
Dibutyl phenyl phosphate
Isopropyl triphenyl phosphate (TIPP)
Phenol, dimethyl-phosphate (3 :1)
Triaryl phosphate (TAP)
Tributyl phosphate (TBP)
Tricresyl phosphate (TCP) +/- absence de oTCP ²⁶
Triisobutyl phosphate
Triisopropyl phenyl phosphate
Trimethylolpropane phosphate (TMPP)
Trimethylpropane ester (TMPE)
Triphenyl phosphate (TPP)
Autres
Epoxyde cyclique aliphatique
Pentaerythritol monobutyrate triheptanoate (PE)

Annexe 6- Liste des composés retrouvés dans les huiles usagées^{2, 24, 29, 80}

HUILES USAGEES / PYROLYSE (400-600°C)
VOCs
2-hexanone
3-methylphenol
Cyclohexanone
Dimethylphthalate
Méthylisobutylcétone (MIBK)
Octanal
Phenol
Acides
Acide pentatonique
Acide valérique
Alcanes
1,1,3-Tri(alloxy)propane
1,3-Dioxane, 5-(hexadecyloxy)-2-pentadecyl-,trans-
Hexane
Hexane, 1,10 -oxybis
Hexane,2,2,3,4,5,5-hexamethyl-, meso
Octane
Pentane
Aldéhydes
1-piperidinecarboxaldehyde
Acétaldéhyde
Acroléine
Benzaldéhyde
Crotonaldéhyde
Formaldéhyde
Hexanal
iso-Valeraldéhyde
m-Tolualdéhyde
n-Butyraldéhyde
n-Valeraldéhyde
p-Tolualdéhyde
Propionaldéhyde
Alcools
2-t-butyl-2,3-dimethyl-3-buten-1-ol
5-decen-1,ol (Z)-
Aromatiques : HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques)
Acénaphthène
Benzène

Benzo[a]anthracène
Benzo[g][l]benzothiopyrano[4,3]-indole
Chrysène
Fluoranthène
Fluorène
Naphthalène
Naphthalène, 2-(1,1-diméthyl)decahydro-4a-méthyl
Phenanthrène
Pyrène
Toluène
Xylène (isomères)
Esters
Acide décanoïque, 1,2,3-propanetriyl ester
Acide octadécanoïque, 8,9,11,12-tetrakis(triméthylsilyl)oxy-, méthyl ester
Cétones
2-nitro-2-méthylcyclohexanone
3,3-diméthyl-5-(2,2-diméthylpropyl)tetrahydrofuran-2-one
5,6-decanedione
8-benzyluinone
8-méthoxy-2-(p-méthoxyphen yl)-1,2,4,5-tetrahydro-1-benzazocine-3,6-dione
Methanone, (4-éthoxy-3-méthoxyphenyl)(6-méthyl-1,3-benzodioxol-5-yl)-
Azotés
2-naphtylamine, N-phenyl-
Butanimidamide, N-(1-chloro-2-méthyl-1-butenyl)-2-monochloride
Cyanure d'hydrogène (HCN)
Dioctyldiphenylamine
dodecane,1-isocyanate
N-phenyl-1-naphtylamine (PAN)
Phenylethylamine, N-Méthyl-.beta.,3,4-tris-(triméthylsiloxy)
Piperazine, 1-(aminoacetyl)-
Organophosphorés
Acide phosphorique, tris(3-méthylphenyl)ester
Acide phosphorique, tris(4-méthylphenyl)ester
Cresyl diphényl phosphate
Di-cresyl phényl phosphate
di-xylényl dicrésyl phosphate (seulement huiles usées) : $C_{23}H_{25}PO_4$
Diphényl (2-éthylhexyl)phosphate
Esters de butyl phosphate
Esters de crétyl phosphate
mono-xylényl dicrésyl phosphate $C_{22}H_{23}PO_4$
TMPP dès 400°C ⁴ par réaction entre TCP et TMPE (pas toujours retrouvé)
Tri (o, o, o)- crétyl phosphate

tri-xylényl dicrésyl phosphate ou mono- ou di- ortho ethyl phenyl phosphate : $C_{24}H_{27}PO_4$
Tri(m, m, m)- crésyl phosphate
Tri(m, m, p)- crésyl phosphate
Tri(m, p, p)- crésyl phosphate
Tri(p, p, p)- crésyl phosphate
Tributylphosphate (TBP)
Tricrésylphosphate (TCP)
Triéthyl phosphate (TEP)
Triphénylphosphate (TPP)
Tris(2-butoxyethyl)phosphate
Phthalates
Diéthyl phthalate
Siloxanes
Acide 4-hydroxyanthraquinone-2-carboxylique, di-TMS
Silane, methyltriphenoxy
Autres
1,8-Dihydroxyanthraquinone
3-Benzylquinoline
Anthraquinone, 1-p-tolyl
CO
CO ₂
Gallium, tetraethyl-di.mu.-1-piperidinyldi-

Annexe 7- Tableau de synthèse des études sur les organophosphorés ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Fréquence de détection
Moyenne
Minimum-maximum

 $<1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  $1-10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  $>10 \mu\text{g}/\text{m}^3$

	Solbu (2016)	Solbu (2011)	Cranfield (2013)	Hanhela et al. (2005)	Denola et al. (2011)			Nagda et al. (2013)		Rosenberger et al. (2015)	Breuer et al. (2013)		de Ree et al. (2013)		EASA (2017)	Houtzager et al. (2012)	Wang et al. (2014)
Méthode d'échantillonnage	Filtres en fibre de verre + Chromosorb	Tenax	Tenax TA Compteur particule Détecteur PID (VOC) Détecteur CO	Tubes absorbants Filtres		Filtres Matriciel et tubes absorbants			Canister - Cartouches PUF	Canister - Cartouches DNPH	Cartouches DNPH	Filtres fibres de verre Tube gel de silice	Filtre quartz marqué TBP d17 Mousse PUR marqué TPP d15	Filtre en fibres de verre et tube Chromosorb			Prélèvement d'air Tenax TA
	Techniciens	Loaders	5 min	En Vol	Démarrage moteur au sol	Avion 1	Avion 2	Avion 3	étude 4 : Fox 1997	étude 5 : Nagda 2001		Labo 1	Labo2	Avion	Personnel au sol		
PHOSPHATES																	
TCP : tricesyl phosphate (somme)	18% 0,36 0,13-120	0-9% <LOQ <LOQ-0,29	4% ND-28,5	0,14 0,013 (1-8h) max 2,1 (25min)	0,760-51,3 sinon <1,5 (0,08-0,33h)	0-0,26 (2-10,2h)	0-5 (0,02-2,23h)								0,0001-62,230 selon les opérations (15-438 min)	0,009 0-1,515	46% 0,0069 0,0005-0,155
TmCP												<2	0,048-4,8			58% 0,004 <LOD-0,428	
TmppCP						X										55% 0,004 <LOD-0,339	
TmmmCP						X											
TmmpCP						X										64% 0,006 <LOD-0,691	
TpCP						X						<2	0,048-4,8			31% 0,002 <LOD-0,057	
TpppCP						X											
ToCP : orto-tricesyl-phosphate	ND		ND	0,07 ND-0,08					ND	ND		<2	0,002-0,95			0% <LOD <LOD-<LOD	ND
TompCP																0% <LOD <LOD-<LOD	
ToomCP																0% <LOD <LOD-<LOD	
Toop/ommCP																0% <LOD <LOD-<LOD	
ToppCP																0% <LOD <LOD-<LOD	
BDPP																	
DBPP : dibutylphenylposphate	80% 7,6 <LOQ-1700	38% <LOQ <LOQ-0,84	90-100% 0,07-0,77														99% 0,015 <LOD-0,193
DPEHP : diphenyl-2-ethylhexyl phosphate																	62% 0,076 <LOD-0,642
MDCP : monoorthocresylphosphate																	100% 0,430 0,037-2,484
TBEP : tris(butoxy-ethyl)phosphate				1,07 ND-21,8													99% 0,016 <LOD-0,324
TBP : tributyl phosphate																	100% 0,430 0,037-2,484
TCEP : tris(chloro-ethyl)phosphate																	99% 0,016 <LOD-0,324
TCPP : tris(chloroisopropyl)phosphate																	100% 0,506 0,023-9,977
TDOPP : tris(1,3-dichloroisopropyl)phosphate																	95% 0,008 <LOD-0,049
TEHP : tris(2-ethylhexyl)phosphate																	47% 0,004 <LOD-0,088
TIBP : tri-iso-butyl phosphate			80% 0,036 <LOQ-0,20														99% 0,102 <LOD-1,610
TMPP : Trimethylpropane phosphate									ND	ND		<2	0,05-0,2				
TnBP	82% 38 <LOQ-9400	98% 0,98 <LOQ-5,6	100% 0,44 0,02-4,1									<2-35	1,3-29				
TPP : triphenyl phosphate			2,3% 0,11														99% 0,009 0,001-0,119
Trialkyl phosphate (TPP +TBP+ TEHP)				0,65 Max 5,82								<2	0,02-0,83				
Triethyl phosphate																	0% <LOD <LOD-<LOD
TXP : trixylil phosphate																	
LVOC	68% 360 <LOQ-34	3% 1850 <LOQ-2,4	200-2700	0->10 ppm								460-760	130-580				205,03

Annexe 8- Tableau de synthèse des études sur les classes chimiques moins documentées (µg/m³)

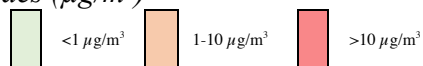
Fréquence de détection
Moyenne
Minimum-maximum

<1 µg/m³ 1-10 µg/m³ >10 µg/m³

	Leco (2013)		Hanhela et al. (2005)		Michaelis (2010)	EASA (2017)	Guan et al. (2014)	Guan et al. (2013)
Méthode d'échantillonnage	Actif (30') Stir bar sorption extraction (SBSE)	Passif (30min) Stir bar sorption extraction (SBSE)	Tubes absorbants Filtres		voir BRE (2002) report		Tenax TA Cartouche DNPH	Seringue 50mL Tenax TA
	En Vol				Démarrage moteur (sol)			
AZOTES								
Acetonitrile					35,7	82,4% 19,4 0,2-269		
Benzoyl isothiocyanate		83%						
Dimethylformamide						3,5% 7,7 63,9-541	<LOD <LOD-7,3	81%
Diethyltoluamide						16,8% 0,9 0,0-19,2		
DODPA: dioctyldiphenylamine			0,006 (2-7h) Max 0,040 (5h)	0,026 (2-6h) Max 0,039 (2h)				
PAN: Phenyl-alpha-naphtylamine			0,043 (2-7h) Max 0,081 (5h)	0,0029 (2-6h) Max 0,0055 (2h)				
PHTALATES								
1,2-benzenedicarboxylic acid, bis(2-methylpropyl) ester : diisobutyl phthalate	92%							
1,2-benzenedicarboxylic acid, diisooctyl ester : diisooctyl phthalate	91%							
Dibutyl phthalate		95%				1,5% 0,3 0,0-5,3		
Diethyl phthalate		96%				22,1% 0,7 0,0-4,1		
Diisobutyl phthalate						4,4% 0,5 0,0-7,1		
DOCP: dioctylterephthalate								
Phthalic anhydride						9,1% 0,9 0,0-48,9		
SILOXANES								
Cycloheptasiloxane						18,2% 0,7 0,0-3,4		
Cyclohexasiloxane						30,3% 1,0 0,0-9,3		
Cyclopentasiloxane						96,5% 18,0 0,1-277		
Cyclotetrasiloxane						62,6% 1,8 0,0-35,4		
Cyclotrisiloxane						55% 1,8 0,0-42,3		
Decamethylcyclopentasiloxane					5,0			

Annexe 9- Tableau de synthèse des études sur les aldéhydes ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Fréquence de détection
Moyenne
Minimum-maximum



Méthode d'échantillonnage	Leco (2013)	Weisel et al. (2013)	Nagda et al. (2013)				Rosenberger et al. (2015)	Michaelis (2010)	EASA (2017)	Wenjing et al. (2012)	Gao et al. (2015)	Wang et al. (2014)	Guan et al. (2014)	Guan et al. (2013)
	Actif (30') Stir bar sorption extraction (SBSSE)	Tubes multi absorbants (VOC) Cartouches DNPH (formaldehyde/ acetaldehyde/acroleine) UV(ozone), IR (CO2)	Tube charbon	Cartouche DNPH	Canister- Cartouches PUF	Canister - Cartouches DNPH	Cartouches DNPH	voir BRE (2002) report		Tenax TA Compteur particules Détecteur CO2 / O3	Tenax TA Détecteur Ozone	Tenax TA	Tenax TA Cartouche DNPH	Seringue 50mL Tenax TA
			etude 1 : ASHRAE	etude 2 : Deschow 1997	etude 4 : Fox 1997	etude 5 : Nagda 2001								
ALDEHYDES														
2-Hydroxybenzaldehyde									6,8% 0,5 0,0-8,0					
2,5-dimethylbenzaldehyde							0,6 0,1-2,1							
4-OPA : 4-oxopentanal														
Acetaldehyde		<20,45			14,4 4,4-30	17,0 4,5-70,2	6,5 0,3-90	5,4	2,8-9,1					
Acroleine		<9			0,45 0,1-6,1			0,6	0,1-1,0 67,6% 2,0					
Benzaldehyde					1,9 0-8			0,6	0,0-15,0 100%	0-4,1		6,26	6,1 <LOD-106,2	99%
Butanal									17,1% 0,7					
Capronaldehyde							1,8 0,2-7,6	2,9	0,1-4,5					
Crotonaldehyde							0,2 <LOD-1,5	1,5	<LOD-0,3					
Decanal	92%	6,4 max 76,6		8,6	5,0	5,5	5,7		85,9% 10,5 0,0-54,0			24,43	14,8 <LOD-62,2	90%
Formaldehyde		6,1	<0,6-6	3,7-32	1,5-3,2	2,5-13	0,4-44	3,9	2,7-13,9 71,8% 2,3					
Heptanal		3,6 max 18,7							0,1-13,6 1,1-3,2					
hexaldehyde									90,9% 4,4					
Hexanal		8,2 max 32,7						1,1	0,0-14,4		100% 2,00-9,6			70%
Isovaleraldehyde							2,15 0-12,4		0,5-3,5					
methacroleine								1,5					<LOD <LOD-3,9	55%
m-tolualdehyde							1,8 0-8		1,7-3,8					
n-butylaldehyde							1,05 0-15		0,4-1,5 84,1% 5,4					
Nonanal	93%	5,8 max 81,3						8,5	0,1-31,2		100% 7,00-27,69	17,78	12,1 <LOD-70,9	98%
o-tolualdehyde							1,25 0,1-8,8		0,4-2,5 71,8% 2,9					
Octanal		3,9 max 20,9							0,0-31,4			6,79		82%
p-tolualdehyde							1,25 0-6	1,7	1,3-2,7					
Pentanal								1,1						66%
Propanal (2-methylacrolein, isobutenal, methacrylaldehyde, methacrylic aldehyde, 2-methyl-2-propenal)					2,5 1,5-5,1		2,35 0-94	1,6						
Propionaldehyde									0,5-2,1 66,5% 1,4					
Undecanal									0,1-5,2					
Valeraldehyde							1,3 0-5,9		0,3-5,5					

Annexe 10- Tableau de synthèse des études sur les cétones (µg/m³)

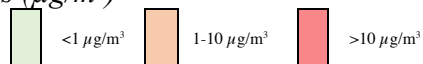
Fréquence de détection
Moyenne
Minimum-maximum

<1 µg/m ³	1-10 µg/m ³	>10 µg/m ³
----------------------	------------------------	-----------------------

Méthode d'échantillonnage	Leco (2013)	Cranfield (2013)	Weisel et al. (2013)	Nagda et al. (2013)				Michaelis (2010)	EASA (2017)	Gao et al. (2015)	Wang et al. (2014)	Guan et al. (2014)	Guan et al. (2013)
	Passif (30min) Stir Bar Sorption Extraction (SBSE)	Tenax TA Compteur particule Détecteur PID (tVOC) Détecteur CO	Tubes multi absorbants (VOC) Cartouches DNPH (formaldehyde/ acetadehyde/acroleine) UV(ozone), IR (CO2)	Cartouche DNPH	Canister	Canister - Cartouches PUF	Canister- Cartouches DNPH	voir BRE (2002) report		Tenax TA Détecteur Ozone	Tenax TA	Tenax TA Cartouche DNPH	Seringue 50mL Tenax TA
	5 min			etude 2 : Deschow 1997	etude 3 : Dumyahn 2000	etude 4 : Fox 1997	etude 5 : Nagda 2001						
CETONES													
2-butanone								2,2					57%
2-hexanone								4,9					
									90,9%				
									3,9				
5,9-Undecandien-2-one-6,10- dimethyl									0,1-26,4				
			3,8							100%		<LOD	
6-MHO : 6-methyl-5-heptène-2-one			max 41,23							1,91-11,81		<LOD-23,2	53%
									99,7%				
				58,4	40,8	49,9			15,7	100%		8,2	
Acetone	47,44			7,4-579	52-150	23-70	22-130	44,5	0,8-87,2	1,30-100,50	0,46	<LOD-384,4	90%
									34,1%				
Acetophenone									1,6				85%
									0,0-49,5				
									86,2%				
									2,9				
Butanone					3-16	5,8-20	2,2-9,4		0,1-31,8				
Cyclohexanone													80%
Diphenylpropanetrione	96%												
(E)-6,10-dimethyl-5,9-undecadien-2-one :													
geranylacetone	96%												
									34,1%				
									3,3				
Hydroxyacetone									0,0-161,0				
Methyl butyl cetone (4-methylpentan-2-one)								1,3					

Annexe 11- Tableau de synthèse des études sur les acides ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Fréquence de détection
Moyenne
Minimum-maximum



Méthode d'échantillonnage	Leco (2013)	Weisel et al. (2013)	EASA (2017)	Gao et al. (2015)	Wang et al. (2014)	Guan et al. (2013)
	Passif (30min) Stir Bar Sorption Extraction (SBSE)	Tubes multi absorbants (VOC) Cartouches DNPH (formaldehyde/ acetadehyde/acroleine) UV(ozone), IR (CO2)		Tenax TA Décteur Ozone	Tenax TA	Seringue 50mL Tenax TA
ACIDES						
1-phenanthrenecarboxylic acid, 1,2,3,4,4a,9,10,10a-octahydro-1,4a-dimethyl-7-(1-methylethyl)-, methyl ester, [1R-(1à,4aà,10aà)]-	86%					
Acide acétique		12,3-24,6	96,8% 11,8 0,1-59,4	100% 0,75-8,98	11,43	95%
Acide benzoïque			90,9% 5,3 0,1-72,8			
Acide decanoïque			24,4% 0,8 0,0-5,4			
Acide formique		<9,41	17,9% 0,7 0,0-33,9			
Acide hexanoïque			89,4% 3,8 0,0-16,6			
Acide nonanoïque			80,0% 1,9 0,1-6,1			
Acide octanoïque			75,9% 2,1 0,1-8,1			
Anhydride phénylmaléique			7,9% 0,3 0,0-6,1			

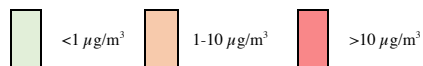
Annexe 12- Tableau de synthèse des études sur les aromatiques (µg/m³)

Fréquence de détection			
Moyenne			
Minimum-maximum	<1 µg/m³	1-10 µg/m³	>10 µg/m³

Méthode d'échantillonnage	Leco (2013)	Cranfield (2013)	Nagda et al. (2013)					Michaelis (2010)	EASA (2017)	Wenjing et al. (2012)	Wang et al. (2014)	Guan et al. (2014)	Guan et al. (2013)			
	Actif (30') Stir bar sorption extraction	Passif (30min) SBSE	Tenax TA Compteur particule Détecteur PID (tVOC) Gas monitor CO	Cartouche DNPH	Boîte acier inoxydable	Canette acier inoxydable - cartouches PUF	Canette acier inoxydable - Cartouches DNPH	Cartouches absorbantes	voir BRE (2002) report		Tenax TA Ozone meter Compteur particules CO2 monitor	Tenax TA	Tenax TA Cartouche DNPH	Seringue 50m Tenax TA		
	5 min		etude 2 : Deschow 1997	etude 3 : Dumyahn 2000	etude 4 : Fox 1997	etude 5 : Nagda 2001	etude 6 : Ross 2000									
AROMATIQUES																
1-methyl napthalene	94%															
1,3,5-trimethylbenzene											80% 0-4,2					
1,2,4-trimethylbenzene											80% 0-5					
Benzene				1-6			ND				91,2% 8,2 0,2-53,4	100% 0-16	10,01	5,0 <LOD-77,9	99%	
Benzenecarboxylic acid														51%		
Benzothiazole														<LOD <LOD-18,7	52%	
Ethylbenzene									0,2	18,5% 0,7 0,0-10,8	100% 0-12,1	3,76	3,5 <LOD-45,1	79%		
Indane	93%															
Naphthalene				0-2			1 0,8-1,6				16,8% 1,4 0,0-49,1				1,1 <LOD-23,9	94%
Xylene								0,4								
o-Xylene	95%				0-3	1,8 1,6-2,5	ND				32,6% 1,0 0,0-5,8	100% 0-15,6	3,7	5,0 <LOD-62,9	66%	
p-xylene	96%															
p+m-Xylene			1,78 ND-52,3			5,4 4,7-7,6	3,6 0,8-24				49,4% 1,6 0,0-11,7				3,0 <LOD-70,7	98%
Phenol											47,4% 1,2 0,1-5,0					57%
Styrene									0,2	10,3% 0,5 0,0-3,8		1,23	<LOD <LOD-42,4	79%		
Toluene			13,93 ND-170,2	68 8-108	9-29	12,4 5,6-32	6,6 2,7-21	2,2-488	8,9	96,2% 11,5 0,0-62,0	100% 0-40	13,41	16,2 <LOD-209,3	100%		

Annexe 13- Tableau de synthèse des études sur les alcanes ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

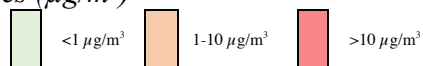
Fréquence de détection
Moyenne
Minimum-maximum



Méthode d'échantillonnage	Cranfield (2013)	Nagda et al. (2013)		Michaelis (2010)	EASA (2017)	Wenjing et al. (2012)	Wang et al. (2014)	Guan et al. (2014)	Guan et al. (2013)
	Tenax TA Compteur particule Détecteur PID (tVOC) Gas monitor CO	Boîte acier inoxydable	Canette acier inoxydable - cartouches PUF	voir BRE (2002) report		Tenax TA Ozone meter Compteur particules CO2 monitor	Tenax TA	Tenax TA Cartouche DNPH	Seringue 50m Tenax TA
	5 min	etude 3 : Dumyahn 2000	etude 4 : Fox 1997						
ALCANES									
2,2,4-Trimethyl pentane					1,5% 0,1 0,0-2,3 55%				
2,2,4,4,6,8,8-Heptamethyl nonane					2,4 0-49,3 28,2%				
2,2,4,6,6-Pentamethyl heptane					1,6 0,0-61,4 3,8%				
3-Methylpentane					0,3 0,0-18,9 14,7%				
Cyclohexane					0,8 0,0-48,1 51,8%				
Decane					1,7 0,1-16,9 67,9%	100% 0-2,7		<LOD <LOD-43,7	58%
Dodecane					1,9 0,0-17,6 48,2%	100% 0-2,8	4,73	3,1 <LOD-30,0	75%
Heptadecane					1,1 0,0-3,1 24,1%				
Heptane					0,9 0,1-24,8 53,5%	100% 0-2,3		<LOD <LOD-7,5	59%
Hexadecane					1,2 0,0-3,2 12,1%				
Hexane		ND	ND	1,3	0,5 0,0-4,8	100% 0-3,2			
Isoalcanes C14-C20					82,9% 62,4 0,2-355 12,9%				
Methylcyclohexane					0,9 0,0-73,8 60%				
Nonane					2,0 0,1-12,9	100% 0-3		<LOD <LOD-11,7	62%
Octane						100% 0-1,7		<LOD <LOD-8,2	67%
Pentadecane					64,1% 1,5 0,0-6,1 17,1%				
Pentane					1,4 0,0-63,7 87,4%	100% 0-21,8			
Tetradecane					2,6 0-13,3 68,2%				
Tridecane					1,7 0,0-12,2 75,3%	20% 0-4,914			
Undecane (C11)	2,74 ND-87,3			1,3	2,2 0,0-22,3	100% 0-5	2,21	2,4 <LOD-60,3	64%

Annexe 14- Tableau de synthèse des études sur les alcènes (µg/m³)

Fréquence de détection
Moyenne
Minimum-maximum



Méthode d'échantillonnage	Leco (2013)		Cranfield (2013)	Nagda et al. (2013)			Michaelis (2010)	EASA (2017)	Wenjing et al. (2012)	Wang et al. (2014)	Guan et al. (2014)	Guan et al. (2013)
	Actif (30') Stir bar sorption extraction (SBSE)	Passif (30min) Stir bar sorption extraction (SBSE)	Tenax TA Compteur particule Détecteur PID (tVOC) Détecteur CO	Boîte acier inoxydable	Canette acier inoxydable - Cartouches DNPH	Cartouches absorbantes	voir BRE (2002) report		Tenax TA Ozone meter Compteur particules CO2 monitor	Tenax TA	Tenax TA Cartouche DNPH	Seringue 50m Tenax TA
			5 min	etude 3 : Dumyahn 2000	etude 5 : Nagda 2001	etude 6 : Ross 2000						
ALCENES												
(Z)-2,6,10-trimethyl-1,5,9-undecatriene	85%							99,4% 9,0 0,1-46,8			<LOD <LOD-9,8	72%
2-methyl-1,3-butadiene : isoprene								17,4% 1,3 0,0-42,2	40%			
3-Carene								1,8% 0,1 0,0-3,6				
4-Cy-pentadien-1,3-dion4phenyl								44,1% 1,2 0,0-11,7	100%			
a-Pinene	93%							8,8% 0,6 0,0-26,1				
b-Pinene		88%										
Cholesta-3,5-diene								57,6% 2,0 0,0-40,3				
Eucalyptol								93,8% 12,3 0,0-216				
Limonene	93%		11,85 ND-540,3	2-45	30,4 16,5-45,1	2,4-117	9,4	100%	0-126,622	31,21	<LOD-1048,2	89%
Menthol								95,6% 11,6 0,1-60,7		2,5		
Menthone								48,5% 1,5 0,0-13,5				
p-Cymene								7,4% 0,8 0,0-33,4				

Annexe 15- Tableau de synthèse des études sur les alcools (µg/m³)

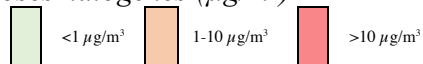
Fréquence de détection
Moyenne
Minimum-maximum

<1 µg/m³ 1-10 µg/m³ >10 µg/m³

Méthode d'échantillonnage	Leco (2013)			Nagda et al. (2013)				Breuer et al. (2013)		Michaelis (2010)	EASA (2017)	Whisthaler et al. (2006)	Wang et al. (2014)	Guan et al. (2014)	Guan et al. (2013)
	Actif (30') Stir bar sorption extraction (SBSE)	Passif (30min) Stir bar sorption extraction	Tube charbon	Cartouche DNPH	Canister	Canister- Cartouches PUF	Canette acier inoxydable - Cartouches DNPH	Cartouches absorbantes	Filtres fibres de verre Tube gel de silice	voir BRE (2002) report		PTR-MS	Tenax TA	Tenax TA Cartouche DNPH	Seringue 50mL Tenax TA
			etude 1 : ASHRAE	etude 2 : Deschow 1997	etude 3 : Dumyahn 2000	etude 4 : Fox 1997	etude 5 : Nagda 2001	etude 6 : Ross 2000	Labo 1						
ALCOOLS															
1-Butanol											57,6% 2,4 0,1-31,5 97,9% 80,7 0,6-1524				75%
1-Propanol															
1-propanol,2-methyl															64%
1,2-Propanediol											98,2% 45,2 0,0-363 70% 5,2 0,0-70,2				
1,3-Butanediol															
2-butoxy-ethanol (ethylene glycol monobutyl ether)										14,5					
2-Ethylhexanol											93,8% 4,0 0,1-14,3		6,13	4,7 <LOD-30,3	97%
2-hexanol, 2,3-dimethyl- 2-methyl-2-heptanol	83% 83%														
2-Phenoxyethanol											95% 4,6 0,1-29,4				
2-Propanol						18,5 12-43 3-200		X		338,8					
2,6-bis(1,1-dimethylethyl)-1,4-benzenediol		82%													
3-Methylbutanol											23,2% 0,8 0,0-10,2				
3,7,11-trimethyl-1,6,10-dodecatrien-3-ol : nerolidol	79%														
3,7,11-trimethyl-2,6,10-dodecatrien-1-ol : farnesol	79%														
Benzyl alcohol											55% 1,4 0,0-7,3				
Butylated hydroxytoluene (BHT)											16,2% 0,6 0,0-12,2				
Ethanol			3010 560-5460	1116 280-3349	324 280-4300	626 20-3000 100-4000	X			173,6	100% 82,3 7,0-616	X			
Glycerine											1,5% 0,4 0,5-127 88,2% 12,6 0,1-248				
Isopropyl alcohol															
Methanol															
phenol, 2-(2H-benzotriazol-2-yl)-4,6-bis(1,1- dimethylpropyl)	83%														
Propylene glycol									53-580	59,5					
tert.-Butanol											2,6% 0,2 0,0-13,6				
trans-9-hexadecen-1-ol	93%														

Annexe 16- Tableau de synthèse des études sur les composés halogénés (µg/m³)

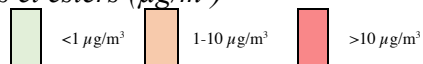
Fréquence de détection
Moyenne
Minimum-maximum



Méthode d'échantillonnage	Cranfield (2013)	Nagda et al. (2013)		Allen et al. (2012)	Michaelis (2010)	EASA (2017)	Wang et al. (2014)	Guan et al. (2014)	Guan et al. (2013)
	Tenax TA Compteur particule Détecteur PID (tVOC) Détecteur CO	Canister	Canister - Cartouches PUF	Canister - Cartouches DNPH	tubes PUF, XAD2	voir BRE (2002) report		Tenax TA Tenax TA Cartouche DNPH	Seringue 50mL Tenax TA
	5 min	etude 3 : Dumyahn 2000	etude 4 : Fox 1997	etude 5 : Nagda 2001					
HYDROCARBURES HALOGENES									
1,1,1-trichloroethane (methyl chloroforme)						2,4			
1,1,2-trichloroethane						2,1			
1,1,2,2-tetrachloroethane						2,8			
1,2-dibromoethane (ethylene dibromide)						3,3			
1,2-dichlorobenzene						0,6			
1,2-dichloroethane						2,3		<LOD	
1,2-dichloroethene						7,5		<LOD-10,0	53%
1,2-dichloropropane						0,7			
1,3-dichlorobenzene						0,6		<LOD	
1,4-dichlorobenzene						9,7%		<LOD-12,8	56%
						1,0		<LOD	
BDE 47						1,1		<LOD-228,3	65%
BDE 99					63% 0,0013 max 20 22% <0,0013 max 41				
BDE 100					29% <0,0004 max 9,4				
BDE 183					32% 0,0013 max 98				
BDE 209					42% <0,0012 max 2100				
Bromoforme (tribromomethane)						1,7			
Bromodichloromethane						11,5			
Chlorobenzene						1,1			
cis-1,2-dichloroethene						2,3			
cis-1,3-dichloropropene (perchloethylene)						1,8			
Dérivés perfluorés							14,4% 5,5		
Dibromochloromethane							1,1-110		
						11,2			
Dichloromethane			1,3-5,1	132 7,6-2900			11,2% 1,1 0,0-71,9		
TCE: Tetrachloroethene	0,43 ND-20,1	5-28	3,5 2,4-6,6	5,1 2,8-12			57,9% 3,8		
Tetrachloromethane (carbon tetrachloride)							2,57	2,8	<LOD-303,9 85%
trans-1,3-dichloropropene						7,3			
trichloroethene						9,4			
Trichloromethane (chloroforme)						1,9			
						2,6			
						13,2			

Annexe 17- Tableau de synthèse des études sur les éthers et esters (µg/m³)

Fréquence de détection
Moyenne
Minimum-maximum



Méthode d'échantillonnage	Leco (2013)		Michaelis (2010)	EASA (2017)	Guan et al. (2014)	Guan et al. (2013)
	Actif (30') Stir bar sorption extraction (SBSE)	Passif (30min) Stir bar sorption extraction (SBSE)	voir BRE (2002) report		Tenax TA Cartouche DNPH	Seringue 50mL Tenax TA
ESTERS						
1-Methoxy-2-propylacetate				28,5% 1,0 0,0-9,7 61,8%		
2-Ethylhexyl salicylate				2,3 0,0-19,1		
2-hydroxybenzoic acid, methyl ester : methyl salicylate		95%		56,2% 1,3 0,0-6,7		
2,2,4-Trimethyl- pentanedioldiisobutyrate						
benzoic acid, undecyl ester	81%			55,3% 2,2 0,0-44,8 90,3%		70%
Butyl acetate				4,9 0,4-68,1	1,1 <LOD-44,0	88%
Ethyl acetate						
Hexadecanoic acid, 1,1-dimethylethyl ester	81%					
Hexadecanoic acid, ethyl ester : ethyl palmitate	89%					
Homosalate				17,9% 1,6 8,9-114,8 65,3%		
Isopropyl myristate				1,7 0,0-8,6 32,9%		
Isopropyl palmitate				1,0 0,0-19,3		
propanoic acid, 2-methyl-, 1-(1,1-dimethylethyl)-2- methyl-1,3-propanediyl ester	86%					
propanoic acid, 2-methyl-, 2,2-dimethyl-1-(2- hydroxy-1-methylethyl)propyl ester	89%					
propanoic acid, 2-methyl-, 3-hydroxy-2,4,4- trimethylpentyl ester : texanol	91%					
Vinyl acetate			1,7			
ETHERS						
1,1'-Dipropene-1,2-diol ether				3,5% 1,7 9,2-124		
1,2'-Dipropene-1,2-diol ether				3,5% 1,6 8,9-114,8		
Diocetyl ether				93,2% 6,4 0,0-42,8		
Methoxy-bis-1,2'-dipropene-1,2- diol ether				3,5% 2,4 18,5-142		

Annexe 18- Tableau de synthèse des études sur les autres paramètres

Fréquence de détection
Moyenne
Minimum-maximum

	Cranfield (2013)	Weisel et al. (2013)	Maddalena (2008)	Weisel et al. (2012)	Rosenberger et al. (2015)	EASA (2017)			Li et al. (2014)
Méthode d'échantillonnage	Tenax TA Compteur particule Détecteur PID (tVOC) Détecteur CO	Tubes multi absorbants (VOC) Cartouches DNPH (formaldehyde/acetadehyde/acroleine)	Tubes PUF, triolein, POG Surface	Papier filtre Whatman	Cartouches DNPH	Mesures NDIR (CO2) Capteurs électrochimiques (O3, CO)			Compteur à particules Détecteur CO2
	5 min					Court trajet	Long trajet	B787	
Autres									
Pyrethrinoides			2,2-1040 ug/m3 0,0015 - 3,6 mg/cm2						
Permethrine		0,031 ug/cm2		<LOD (LOD=0,001ug/cm2)-0,46 ug/cm2					
Phenothrine		0,034 ug/cm2		<LOD(LOD=0,001ug/cm2)-0,06 ug/cm2					
CO : monoxyde de carbone	<1->5ppm					<LOD (LOD=0,5ppm) <LOD-4,8 ppm	<LOD (LOD=0,5ppm)		
Particules (toutes tailles)									362,3-124 665 L
Ozone					<LOD (LOD=0,02 ppm) <LOD-0,15 ppm	6 ppm 2-18 ppm	21 ppm 1-529 ppm		
									<1000 ppm
CO2						1417 ppm 1050-2771 ppm	1282 ppm 955-1230 ppm	1242 ppm 968-2019 ppm	792-2253 ppm (air en recirculation) 531-2132 ppm (air d'alimentation)

Annexe 19- Tableau de synthèse des méthodes d'échantillonnage (1)

Paramètres généraux	Air total	Pesticides sVOCs	Aldéhydes/ Cétones	HAP et autres aromatiques
CO Détecteur absorption IR non dispersive - LD : 0,1 ppm Détecteur électrochimique - LD : 0,1 ppm	Prélèvement manuel avec seringue - Volume : 50 mL Dust track (TSI) Model 8520 aerosol monitoring - Temps d'échantillonnage : 1 sec	Matières absorbantes - Tubes XAD-4 - Disques en mousse de Polyurethane - Disques en PE remplis de trioléine - POG : verre enduit de polymère - Extraction : 86-113% ⊕ Rapide, facile à préparer et à extraire	GÉNÉRAL Cartouches DNPH - LD : *Acétaldéhyde (1) : 4 µg/m³ *Acroléine (2) : 0,02 mg/m³ *Formaldéhyde (3) : 0,011 mg/m³ - Volume : (1)(3) 6L, (2) 20L Barboteur widget avec solution T de Girard - LD : 18 µg/m³ - Volume : 60L Tubes absorbants (Tenax TA, Carboxen 569, Carbosieve III) - Débit : 20 mL/min - Volume : 3-10 L	HAP Tubes absorbants : - XAD-2 - Mousse de polyuréthane TOLUENE Tubes absorbants : - Tenax TA BENZENE Charbon actif / désorption par disulfure de carbone - LD : 0,12 mg/m³ - Volume : 40 L
CO₂ Détecteur électrochimique Détecteur absorption IR non dispersive (TELAIRE 7001 CO ₂ monitor) - LD : 0 ppm - <2% ⊕ Pas sensible à la pression	Echantillonnage à intégration avec capteurs et tubes absorbants ⊕ Haute résolution ⊖ Coût, encombrement			
O₃ Détecteur absorption UV - Temps d'échantillonnage : 1 min - LD : 1 ppb Détecteur chimiluminescence - LD : 0,0015 mL/m³ Echantillonneur à choc avec carmin d'indigo et détection spectromètre - LD : 0,0011 mg/m³ Détecteur électrochimique			ACÉTONE Echantillonnage sur charbon actif/ désorption disulfure de carbone - LD : 100 ou 0,5 mg/m³ - Volume : 0,5 ou 40 L ACROLÉINE Cartouches DNPH/désorption acétonitrile - LD : 0,02 mg/m³ - Volume : 20 L Tube XAD2/ désorption toluène - LD : 0,12 mg/m³ - Volume : 24 L BUTANONE Echantillonnage sur charbon actif/ désorption disulfure de carbone - LD : 50 mg/m³ - Volume : 3 L Gel de silice/ désorption diéthyl éther - LD : 1,7 mg/m³ - Volume : 10 L FORMALDÉHYDE Tube XAD2/ désorption toluène - LD : 0,3 mg/m³ - Volume : 10 L Cartouches DNPH/désorption acétonitrile - LD : 0,011 mg/m³ - Volume : 6 L	
Particules Mesure gravimétrique après échantillonnage par cyclone et filtre (1) ou échantillonneur de poussières BIA (2) - Volume d'échantillonnage : 200L (1) ou 900L (2) - LD : 0,5 mg/m³ (1) ou 0,3 mg/m³ (2) Compteur de particules à condensation (TSI Model 825 P-track) - Intervalle d'échantillonnage : 1sec - Gamme détection : 0,01-1 µm ⊖ Recharge toutes les 8h Compteur de particules à détection photométrique - LD : 2 µg/m³ ⊕ Taille et poids, basse consommation, indépendance mesure/ Débit Compteur de particules FLUKE - Débit: 2n83 L/min ⊕ Indépendance pression, humidité Instruments de mesure de taille aérodynamique				

Annexe 19- Tableau de synthèse des méthodes d'échantillonnage (2)

Composés organiques		Organophosphorés			Autres
Volatils (COV)	Semi-volatils (COSV)	Totaux	COV	TCP	
Tubes Tenax TA (+quartz wool) (+toluène d₃) - Temps d'échantillonnage : 5min à 10h - Volume : 1 ou 2,5 L - Débit : 50-500 mL/min	Cartouches en mousse de polyuréthane	Combinaison filtre + adsorbant - Filtres : fibres de verre, PTFE, acétate de cellulose - Adsorbants : charbon actif, polymères organiques poreux, gel de silice - LOQ: 75 ng/m³ - Débit : 1,5 L/min - Extraction : 93-106%	Echantillonneur si incident : tube verre ou acier inoxydable + matériel adsorbant * Adsorbants : Tenax TA, Chromosorb 106, Anasorb CS - Temps d'échantillonnage : 30-60 min - LD : 0,03-3 µg/m³ - Débit : 200 mL/min - Extraction : 93-97% ⊕ Stable 1 mois, rapide, simple, transportable, modifiable pour sVOCs et non-volatils	Filtres en ester de cellulose - Temps d'échantillonnage: 1-100 min - LD : 0,002-2 mg/m³ - Volume : 2-100 L - Débit : 1-3 L/min	Acides Combinaison d'adsorbants - Volume : 3-10 - Débit : 20 mL/min
Tubes SG 350					HCN
Canister en acier inoxydable		Filtres en quartz marqué + mousse de PUR - Débit : 1-10 L/min		Echantillonneur de Van Netten : filtre MCE ou QMA - Temps d'échantillonnage: jusqu'à 6h Débit : 0,7-0,8 L/min ⊕ Compact, transportable, autonome, simple, rapide, peu coûteux, pas d'interférences électromagnétiques, capture fiable TCP	Filtre en cellulose (soude) - Temps d'échantillonnage : 15 min-8h - LD : 0,2mg/L - Débit : 1-2L/min
Tubes adsorbants charbon activé / désorption disulfure de carbone		Appareil avec filtre en fibres de verre + mousse PUR ou adsorbant XAD-2 - Temps d'échantillonnage: 1h - Débit : 2,7-2,8 m³/h			Tubes de chaux - Temps d'échantillonnage : 15 min-8h - LD : 1mg/m³ - Débit : 0,05-0,2L/min
Détecteur à photo ionisation LD: 1-10 000 ppm Débit : 500 mL/min ⊕ Insensible pression, humidité, température ⊕ Possible combinaison avec capteur CO		Filtres en Téflon et fibres de verre + tube adsorbant Chromosorb - Temps d'échantillonnage: 15-35 min ou 6-7,5h - Volume: 0,03-0,06 m³ ou 0,767-0,875 m³		Tube adsorbant Porapak Q + Laine de verre - Temps d'échantillonnage: 2-6 h - Débit : 2 L/min ⊕ Respect des interférences électromagnétiques	Barbotage (soude) - Temps d'échantillonnage : 60 min - LD : 0,5 ppm - Débit : <1 L/min
	Tubes d'échantillonnage avec gel de silice / DNPH	Filtres en fibres de verre + tube gel de silice			Barbotage (potasse) - Temps d'échantillonnage : 10 min-3h - LD : 0,6 mg/L - Débit : 0,2-1 L/min
					Alcènes/alcanes
					Canister / Tubes adsorbants
					Alcools
					Cartouche DNPH
					Amines
					Absorbant solide
					DCM
					Charbon actif / désorption disulfure
					SO ₂
					Analyseur à fluorescence pulsée
					Esters
					Canister/ Absorbant solide
					PBDE
					Tubes adsorbants XAD2 – mousse de polyuréthane - Débit : 1,5- 8,6 L/min
					NO ₂
					Analyseur à chimioluminescence

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

1. Jensen JK, Hildre TT. Fume Events in Aircraft Cabins. [Thèse de doctorat]. Trondheim, Norvège : norwegian University of Science and Technology ; 2015.
2. Megson D, Ortiz X, Jobst KJ, Reiner EJ, Mulder MFA, Balouet J-C. A comparison of fresh and used aircraft oil for the identification of toxic substances linked to aerotoxic syndrome. *Chemosphere*. sept 2016;158:116-23.
3. Knezevic J. Aerotoxic syndrome as a Mirce mechanics phenomenon. *Istrazivanja i projektovanja za privredu*. 2016;14(4):451-6.
4. de Ree H, van den Berg M, Brand T, Mulder GJ, Simons R, Veldhuijzen van Zanten B, et al. Health risk assessment of exposure to TriCresyl Phosphates (TCPs) in aircraft: A commentary. *NeuroToxicology*. déc 2014;45:209-15.
5. URBASanté. Patent medicine, poison et complot : une note sur le Ginger jake (1^{ère} partie). *Mithridate*. 2010;2:20-1.
6. Ramsden J. An estimate of the chronic exposure to neurotoxins of a neurologically injured pilot. *J. biol. Phys. Chem.* 2016;16:102-95.
7. International civil aviation organization. Guidelines on Education, Training and Reporting Practices related to Fume Events. Circulaire 344-AN/202. Montréal, Québec, Canada : ICAO ; 2015. 26p.
8. National Research Council (U.S.), éditeur. The airliner cabin environment and the health of passengers and crew. Washington, D.C: National Academy Press; 2002. 326 p.
9. Schuchardt S, Bitsch A, Koch W, Rosenberger W. CAQ Preliminary cabin air quality measurement campaign. EASA; 2014. 130p. Disponible: https://www.easa.europa.eu/system/files/dfu/EASA%20CAQ%20Study%20Final%20Report_21.03.2017.pdf
10. ASHRAE. Air Quality within Commercial Aircraft. Guideline 28-2012. Atlanta, Etats-Unis : ASHRAE; 2012. 58p.
11. Bergin S, Baalbergen E, Greene G, Hodgkinson J, Jentink H, Kos J, et al. On-board air quality : Literature review and methodological survey. *Future Sky Safety* ; 2016. 65p. Disponible: https://www.futuresky-safety.eu/wp-content/uploads/2016/11/FSS_P7_Cranfield_D7.6_v2.0.pdf
12. Tao H, Meng L, Liping P, Jun W. Studies on New Air Purification and Air Quality Control System of Airliner Cabin. *Procedia Engineering*. 2011;17:343-53.
13. Winder C. Aerotoxic Syndrome [Thèse de doctorat]. Sydney, Australie : The University of New South Wales ; 2010.
14. Amiri SN, Jones B, Mohan KR, Weisel CP, Mann G, Roth J. Study of Aldehydes, Carbon Monoxide, and Particulate Contaminants Generated in Bleed-Air Simulator. *Journal of Aircraft*. 30 déc 2016;1-11.
15. Wang C, Yang X, Guan J, Li Z, Gao K. Source apportionment of volatile organic compounds (VOCs) in aircraft cabins. *Building and Environment*. nov 2014;81:1-6.
16. Michaelis S, éditeur. Aviation contaminated air reference manual. 1st ed. England: S. Michaelis; 2007. 816 p.
17. Association française de normalisation. Norme européenne NF EN 4618 : juillet 2010 [Non publiée]. La Plaine Saint-Denis, France : AFNOR., impr.2010; 2010. 77p.

18. Hanhela PJ, Kibby J, DeNola G, Mazurek W. Organophosphate and amine contamination of cockpit air in the Hawk, F-111 and Hercules C-130 aircraft. Defence Science and Technology Organisation ; 2005. 31p. Disponible: <http://dspace.dsto.defence.gov.au/dspace/handle/1947/3349>
19. Ramsden JJ. Jet engine oil consumption as a surrogate for measuring chemical contamination in aircraft cabin air. *J Biol Phys Chem*. 2013;13:114–118.
20. Chaturvedi AK. Aerospace Toxicology Overview: Aerial Application and Cabin Air Quality. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. 2011;214:40-15.
21. Lamb J, McGonagle C, Cowie H, Cherrie J. Cabin Air – surface residue study. IOM ; 2012. 92p. Disponible: http://www.iom-world.org/pubs/IOM_TM1106.pdf
22. de Ree H, Agterberg H, Houtzager M, Havermans J, Bos J. Exposure from airline staff to TCP's from engine oil. ASHRAE Winter Conference. 2017:8p.
23. ASHRAE. Air Quality within Commercial Aircraft. Standard 161-2013. Atlanta, Etats-Unis : ASHRAE; 2013. 26p.
24. Houtzager M, Havermans J, Noort D, Joosen M, Bos J, Jongeneel R, et al. AVOIL Characterisation of the toxicity of aviation turbine engine oils after pyrolysis. EASA; 2015. 157p. Disponible: https://www.easa.europa.eu/system/files/dfu/EASA%20AVOIL_final%20report_final%20version_160217.pdf
25. Air Accident Investigation Unit Ireland. Serious Incident Airbus A320-214, EI-DVJ. AAIU;2017.22p.Disponible <http://www.aaiu.ie/sites/default/files/report-attachments/REPORT%202014-003.pdf>
26. Eckels SJ, Jones B, Mann G, Mohan KR, Weisel CP. Aircraft Recirculation Filter for Air-Quality and Incident Assessment. *Journal of Aircraft*. janv 2014;51(1):320-6.
27. Li Z, Guan J, Xudong Yang, Lin C-H. Source apportionment of airborne particles in commercial aircraft cabin environment: Contributions from outside and inside of cabin. *Atmospheric Environment*. juin 2014;89:119-28.
28. Schindler BK, Weiss T, Schütze A, Koslitz S, Broding HC, Bünger J, et al. Occupational exposure of air crews to tricresyl phosphate isomers and organophosphate flame retardants after fume events. *Archives of Toxicology*. avr 2013;87(4):645-8.
29. Allen JG, Sumner AL, Nishioka MG, Vallarino J, Turner DJ, Saltman HK, et al. Air concentrations of PBDEs on in-flight airplanes and assessment of flight crew inhalation exposure. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*. juill 2013;23(4):337-42.
30. Weisel C, Weschler CJ, Mohan K, Vallarino J, Spengler JD. Ozone and Ozone By-Products in the Cabins of Commercial Aircraft. *Environ Sci Technol*. 7 mai 2013;47(9):4711-7.
31. Gao K, Xie J, Yang X. Estimation of the contribution of human skin and ozone reaction to volatile organic compounds (VOC) concentration in aircraft cabins. *Building and Environment*. déc 2015;94:12-20.
32. Maddalena R, McKone T. Insecticide Exposures on Commercial Aircraft: A Literature Review and Screening Level Assessment. Environmental Energy Technologies Division ; 2008. 53p. Disponible sur: <https://escholarship.org/uc/item/1fs2h82k>
33. Mohan KR, Weisel CP. Sampling scheme for pyrethroids on multiple surfaces on commercial aircrafts. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*. 2010;20(4):320–325.

34. Weisel CP, Isukapalli S. Quantifying Exposure to Pesticides on Commercial Aircraft. *Airliner Cabin Environment Research* ; 2012. 19p. Disponible: http://fdx.alpa.org/portals/26/docs/0818_ACER.pdf
35. Murawski J. Case study : Analysis of Reported Contaminated Air Events at One Major US Airline in 2009-10. Congrès (41, 2011, Portland, Oregon). International Conference on Environmental Systems. American Institute of Aeronautics and Astronautics ; 2011. 11p.
36. Shehadi M, Jones B, Hosni M. Characterization of the frequency and nature of bleed air contamination events in commercial aircraft. *Indoor Air*. juin 2016;26(3):478-88.
37. Bundestelle für Flugunfalluntersuchung. Studie über gemeldete Ereignisse in Verbindung mit der Qualität der Kabinenluft in Verkehrsflugzeugen. BFU; 2014. 97p. Disponible: https://www.bfu-web.de/DE/Publikationen/Statistiken/Tabellen-Studien/Tab2014/Studie_Fume_Events_2014.pdf?__blob=publicationFile
38. Michaelis S. Health and flight safety implications from exposure to contaminated air in aircraft [Thèse de doctorat]. University of New South Wales; 2010.
39. Winder C. International Aero Industry Conference : Contaminated air protection : Proceedings of the BALPA Air Safety and Cabin Air Quality International Aero Industry Conference. British Airline Pilots Association (BALPA), School of Safety Science, University of New South Wales ; 2005. 320p.
40. Murawski JT, Supplee DS. An attempt to characterize the frequency, health impact, and operational costs of oil in the cabin and flight deck supply air on US commercial aircraft. *Journal of ASTM International*. 2008;5(5):1-15.
41. Aldridge WN, Barnes JM. Neurotoxic and biochemical properties of some triaryl phosphates. *Biochemical Pharmacology*. mai 1961;6(3):177-88.
42. Duarte DJ, Rutten JMM, van den Berg M, Westerink RHS. In vitro neurotoxic hazard characterization of different tricresyl phosphate (TCP) isomers and mixtures. *NeuroToxicology*. mars 2017;59:222-30.
43. Hausherr V, Schöbel N, Liebing J, van Thriel C. Assessment of neurotoxic effects of tri-cresyl phosphates (TCPs) and cresyl saligenin phosphate (CBDP) using a combination of in vitro techniques. *NeuroToxicology*. mars 2017;59:210-21.
44. Aldridge WN. Tricresyl phosphates and cholinesterase. *Biochemical Journal*. 1954;56(2):185.
45. Freudenthal RI, Rausch L, Gerhart JM, Barth ML, Mackerer CR, Bisinger EC. Subchronic neurotoxicity of oil formulations containing either tricresyl phosphate or tri-orthocresyl phosphate. *Journal of the American College of Toxicology*. 1993;12(4):409-416.
46. Henschler D, Bayer H-H. Toxikologische untersuchungen über triphenylphosphat, trixylenylphosphate und triarylphosphate aus mischungen homologer phenole. *Naunyn-Schmiedeberg's Archives of Pharmacology*. 1958;233(6):512-517.
47. Henschler D. Beziehungen zwischen chemischer Struktur und Lähmungswirkung von Triarylphosphaten. *Naunyn-Schmiedeberg's Archives of Pharmacology*. 1959;237(5):459-472.
48. Terry AV. Functional consequences of repeated organophosphate exposure: Potential non-cholinergic mechanisms. *Pharmacology & Therapeutics*. juin 2012;134(3):355-65.
49. Winder C, Balouet JC. The Toxicity of Commercial Jet Oils. *Environmental Research Section A*. 2002;89:164-146.
50. Kofod DH, Jørs E, Varma A, Bhatta S, Thomsen JF. The use of self-reported symptoms as a proxy for acute organophosphate poisoning after exposure to chlorpyrifos 50% plus

- cypermethrin 5% among Nepali farmers: a randomized, double-blind, placebo-controlled, crossover study. *Environmental Health*. 2016; 15(1):132-122.
51. Harrison R, Murawski J, McNeely E, Guerriero J, Milton D. Exposure to aircraft bleed air contaminants among airline workers : a guide for health care providers. FAA ; 2009. 27p. Disponible : <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=E73CEFFB98F01990B9EB23871ED93CD2?doi=10.1.1.566.4291&rep=rep1&type=pdf>
 52. Nagda1* NL, Hodgson2 M. Low Relative Humidity and Aircraft Cabin Air Quality. *Indoor Air*. 1 sept 2001;11(3):200-14.
 53. Cui W, Wang H, Wu T, Ouyang Q, Hu S, Zhu Y. The influence of a low air pressure environment on human metabolic rate during short-term (< 2 h) exposures. *Indoor Air*. mars 2017;27(2):282-90.
 54. Humphreys S, Deyermund R, Bali I, Stevenson M, Fee JPH. The effect of high altitude commercial air travel on oxygen saturation: High altitude air travel on oxygen saturation. *Anaesthesia*. mai 2005;60(5):458-60.
 55. Edvardsen A, Akerø A, Hardie JA, Ryg M, Eagan TML, Skjønberg OH, et al. High prevalence of respiratory symptoms during air travel in patients with COPD. *Respiratory Medicine*. janv 2011;105(1):50-6.
 56. Weisel CP, Weschler CJ, Mohan K, Spengler J, Vallarino J, Nazaroff WW. Risk to Ozone and ozone-derived oxydation products on commercial aircraft. *Environmental & Occupational Health Sciences Institute*. 69p.
 57. S Mackenzie Ross, A Harper, J Burdon. Ill health following exposure to contaminated aircraft air : psychosomatic disorder or neurological injury ?. *J Occup Health safety*. 2006;22(6): 521-528.
 58. Michaelis S. Aircraft cabin air contamination and oil seals. Congrès (25 ; 2016 ; Barcelone). *EpicoH Conference Epidemiology in Occupational Health*. 21p.
 59. Murawski J, Loraine T. Cabin air quality onboard large aeroplanes. *CGAQE global cabin air quality executive* ; 2010. 18p.
 60. Ross SM. Cognitive function following exposure to contaminated air on commercial aircraft: A case series of 27 pilots seen for clinical purposes. *Journal of Nutritional & Environmental Medicine*. janv 2008;17(2):111-26.
 61. Wolkoff P, Crump DR, Harrison PT. Pollutant exposures and health symptoms in aircrew and office workers: Is there a link? *Environment international*. 2016;87:74-84.
 62. Pinkerton LE, Hein MJ, Grajewski B, Kamel F. Mortality from neurodegenerative diseases in a cohort of US flight attendants: Neurodegenerative Disease Mortality in Flight Attendants. *American Journal of Industrial Medicine*. juill 2016;59(7):532-7.
 63. Lindgren T, Norbäck D. Health and perception of cabin air quality among Swedish commercial airline crew. *Indoor Air*. 2005;15(s10):65-72.
 64. McNeely E, Gale S, Tager I, Kincl L, Bradley J, Coull B, et al. The self-reported health of U.S. flight attendants compared to the general population. *Environmental Health [Internet]*. déc 2014;13(1). Disponible: <http://ehjournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/1476-069X-13-13>
 65. Hecker S, Kincl L, McNeely E, van Netten C, Harrison R, Murawski J, et al. Cabin air quality incidents project report. *Occupational Health Research Consortium in Aviation and*

- Airliner Cabin Environment Research ; 2014. 117p. Disponible: <http://www.ohrca.org/wp-content/uploads/2014/08/finalreport.pdf>
66. Guan J, Li Z, Yang X. Net in-cabin emission rates of VOCs and contributions from outside and inside the aircraft cabin. *Atmospheric Environment*. juin 2015;111:1-9.
 67. Centre Cochrane Français. Fiche : Rappel des études en épidémiologie. Centre Cochrane Français ; 2011. 11p. Disponible : <http://tutoriel.fr.cochrane.org/fr>
 68. Eilstein D, Tillier C, Demillac R, Kairo C, Lefranc A, Pirard P et al. Démarche générale de l'InVS face à une sollicitation locale en santé environnement. *InVS* ; 2013. 51p. Disponible : http://opac.invs.sante.fr/doc_num.php?explnum_id=8815
 69. Liyasova M, Li B, Schopfer LM, Nachon F, Masson P, Furlong CE, et al. Exposure to tri-ortho-cresyl phosphate detected in jet airplane passengers. *Toxicology and Applied Pharmacology*. nov 2011;256(3):337-47.
 70. Johnson D, Carter MD, Crow BS, Isenberg SL, Graham LA, Erol HA, et al. Quantitation of ortho-cresyl phosphate adducts to butyrylcholinesterase in human serum by immunomagnetic-UHPLC-MS/MS: Quantitation of ortho-cresyl phosphate adducts. *Journal of Mass Spectrometry*. avr 2015;50(4):683-92.
 71. Worek F, Schilha M, Neumaier K, Aurbek N, Wille T, Thiermann H, et al. On-site analysis of acetylcholinesterase and butyrylcholinesterase activity with the ChE check mobile test kit—Determination of reference values and their relevance for diagnosis of exposure to organophosphorus compounds. *Toxicology Letters*. mai 2016;249:22-8.
 72. Schopfer LM, Furlong CE, Lockridge O. Development of diagnostics in the search for an explanation of aerotoxic syndrome. *Analytical Biochemistry*. sept 2010;404(1):64-74.
 73. Tacal O, Schopfer LM. Healthy F-16 pilots show no evidence of exposure to tri-ortho-cresyl phosphate through the on-board oxygen generating system. *Chemico-Biological Interactions*. mai 2014;215:69-74.
 74. Reneman L, Schagen SB, Mulder M, Mutsaerts HJ, Hageman G, de Ruiter MB. Cognitive impairment and associated loss in brain white microstructure in aircrew members exposed to engine oil fumes. *Brain Imaging and Behavior*. juin 2016;10(2):437-44.
 75. Cook N. Breathe easy. *The ROSPA Occupational Safety & Health Journal*. Nov 2011: 13-9
 76. Rosenberger W, Beckmann B, Wrbitzky R. Airborne aldehydes in cabin-air of commercial aircraft: Measurement by HPLC with UV absorbance detection of 2,4-dinitrophenylhydrazones. *Journal of Chromatography B*. avr 2016;1019:117-27.
 77. Solbu K, Daae HL, Olsen R, Thorud S, Ellingsen DG, Lindgren T, et al. Organophosphates in aircraft cabin and cockpit air—method development and measurements of contaminants. *Journal of Environmental Monitoring*. 2011;13(5):1393.
 78. ASTM International. Standard guide for deriving acceptable levels of airborne chemical contaminants in aircraft cabins based on health and comfort considerations D7034-11. West Conshohocken, United States : ASTM International ; 2011. 12p.
 79. Kalman DA, Voorhees KJ, Osborne D, Einhorn IN. Production of a bicyclic phosphite neurotoxic agent during pyrolysis of synthetic lubricant oil. *Journal of fire sciences*. 1985;3(5):322-329.
 80. Van Netten C, Leung V. Hydraulic Fluids and Jet Engine Oil: Pyrolysis and Aircraft Air Quality. *Archives of Environmental Health: An International Journal*. mars 2001;56(2):181-6.

81. Space D, Salgar A, Scheer D, Jones B, Amiri S. Experimental Determination of the Characteristics of Lubricating Oil Contamination in Bleed Air. ASHRAE Winter Conference. 2017;8p. <https://ashraem.confex.com/ashraem/w17/webprogram/Paper21122.html>
82. Bezold A. Environmental Control Systems. BG Verkehr Industriedialog (Airbus, 2013). 28p.
83. Denola G, Hanhela PJ, Mazurek W. Determination of Tricresyl Phosphate Air Contamination in Aircraft. The Annals of Occupational Hygiene. 2011;55(7):722-710.
84. Houtzager M, Havermans J, Bos J. Investigation of presence and concentration of tricresyl phosphates in cockpits of KLM boeing 737 aircraft during normal operational conditions. TNO ; 2013. 56p. https://www.eerstekamer.nl/overig/20140820/tno_rapport_over_onderzoek_naar/document
85. Solbu K, Daae HL, Thorud S, Ellingsen DG, Lundanes E, Molander P. Exposure to airborne organophosphates originating from hydraulic and turbine oils among aviation technicians and loaders. Journal of Environmental Monitoring. 2010;12(12):2259.
86. Nagda NL, Rector HE. A critical review of reported air concentrations of organic compounds in aircraft cabins. Indoor Air. 1 sept 2003;13(3):292-301.
87. Breuer D, Friedrich C, Rosenberger W. Determination of tricresyl phosphate air contamination in aircraft type BAE 146. Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung. 1p.
88. LECO corporation ; Saint Joseph, Michigan USA. Analysis of Aircraft Cabin Air by TD-GCxGC-TOFMS. Life Science and Chemical Analysis Solutions. 2010, 203-821-383. 4p.
89. Guan J, Wang C, Gao K, Yang X, Lin C-H, Lu C. Measurements of volatile organic compounds in aircraft cabins. Part II: Target list, concentration levels and possible influencing factors. Building and Environment. mai 2014;75:170-5.
90. Guan J, Gao K, Wang C, Yang X, Lin C-H, Lu C, et al. Measurements of volatile organic compounds in aircraft cabins. Part I: Methodology and detected VOC species in 107 commercial flights. Building and Environment. févr 2014;72:154-61.
91. Ji W, Zhao B. Estimation of the contribution of secondary organic aerosol to PM2.0 concentration in aircraft cabins. Building and Environment. déc 2014;82:267-73.
92. Solbu K. Airborne organophosphates in the aviation industry : Sampling development and occupational exposure measurements. [Thèse de doctorat]. Oslo, Norvège : University of Oslo; 2011.
93. Overfelt RA, Jones BW. Proposed Test Plans for a Study of Bleed Air Quality in Commercial Airliners. ACER; 2013. 33 p. Disponible: <http://aerotoxic.org/wp-content/uploads/2014/06/Proposed-Test-Plans-Section-320.pdf>
94. Solbu K, Thorud S, Hersson M, Øvrebø S, Ellingsen DG, Lundanes E, et al. Determination of airborne trialkyl and triaryl organophosphates originating from hydraulic fluids by gas chromatography-mass spectrometry. Journal of Chromatography A. août 2007;1161(1-2):275-83.
95. Association française de normalisation. Norme française NF ISO A6000-31 : juillet 2014. La Plaine Saint-Denis, France : AFNOR., impr.2014; 2014. 32p.
96. Solbu K, Hersson M, Thorud S, Lundanes E, Nilsen T, Synnes O, et al. Compact semi-automatic incident sampler for personal monitoring of volatile organic compounds in occupational air. Journal of Environmental Monitoring. 2010;12(5):1195.
97. Eller PM. NIOSH Manual of Analytical Methods. DIANE Publishing; 1994. 1448 p.

98. INRS. Base de données FICHES TOXICOLOGIQUES : Phosphate de tritolyte (n°44). [Internet]. 2014 [cité 18 août 2016]. Disponible : http://www.inrs.fr/dms/ficheTox/FicheFicheTox/FICHETOX_44-8/FicheTox_44.pdf
99. van Netten C. Design of a small personal air monitor and its application in aircraft. *Science of the Total Environment*. 2009;407(3):1206–1210.
100. Agence nationale de sécurité sanitaire alimentation, environnement, travail. Valeurs guides de qualité d'air intérieur. Anses ; 2007. 93p. Disponible: <http://193.178.210.34/ET/DocumentsET/afssset-rapport-benzene-VGAI-vdef.pdf>
101. Austrianwings. Fume event auf Lufthansa Boeing 747-8i. [En ligne]. 2017. [cité le 20 août 2017]. Disponible : <https://www.austrianwings.info/2017/08/fume-event-auf-lufthansa-boeing-747-8i/>
102. Schuchardt S, Bitsch A, Koch W, Rosenberger W. CAQ Preliminary cabin air quality measurement campaign. EASA; 2014. Appendix C130, Organophosphate Measurements. 36p. Disponible: https://www.easa.europa.eu/system/files/dfu/Appendix_20C%20Organophosphates%20EASA%202014.C15%20CAQ_%202015.LVP_.64%20CAQ%20II.pdf
103. Guidez B, Pasquet B, Desert F, Gassman V, Hertert P, Labadie C, et al. Qualité de l'air extérieur en milieu. *Référence de santé au travail*. Déc 2015;144:75-63.
104. Valeurs limites d'exposition professionnelle aux agents chimiques en France - Brochure - INRS [Internet]. [cité le 18 novembre 2017]. Disponible: www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%20984
105. Colas L. Optimisation et validation d'une méthode de dosage des échantillons d'air comprimé par chromatographie en phase gazeuse. *LASEM Toulon*;2012. 39p.
106. Michaelis S. Oil bearing seals and aircraft cabin air contamination. *Sealing Technology*. 2016;2016(4):7–10.

L'ISPB - Faculté de Pharmacie de Lyon et l'Université Claude Bernard Lyon 1 n'entendent donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans les thèses ; ces opinions sont considérées comme propres à leurs auteurs.

L'ISPB - Faculté de Pharmacie de Lyon est engagé dans une démarche de lutte contre le plagiat. De ce fait, une sensibilisation des étudiants et encadrants des thèses a été réalisée avec notamment l'incitation à l'utilisation d'une méthode de recherche de similitude

BOSSARD Marie-Lorraine

Qualité de l'air dans les cabines d'avion : quels moyens d'échantillonnage pour des campagnes de mesures à grande échelle ?

Th. D. Pharm., Lyon 1, 2017, 138p.

RESUMÉ

Proposé en 1999 par Winder, Balouet et Hoffman, le terme de « syndrome aérotoxique » désigne certains symptômes observés chez des personnels embarqués. Ce problème associé à la contamination de l'air des cabines des avions par des molécules potentiellement toxiques suscite un intérêt croissant dans le monde scientifique et est progressivement relayé par la presse grand public. Les effets sanitaires décrits sont nombreux, aigus ou chroniques, et peuvent être respiratoires, neurologiques, systémiques, psychiatriques ou dermatologiques. Le lien direct entre ces effets de santé et la contamination de l'air n'est pas clairement établi à ce jour mais ce lien est complexe à démontrer. Le projet français AviSan s'inscrit dans ce contexte afin d'étudier les expositions professionnelles dans les cabines d'avion en lien avec les événements accidentels de contamination de l'air ou « fume events ». Pour documenter et quantifier les concentrations en polluants susceptibles d'entraîner des effets neurotoxiques des méthodes d'échantillonnages rapides et faciles à mettre en œuvre par l'équipage doivent être disponibles, tout en permettant une analyse d'un maximum des polluants pertinents identifiés à ce jour. Ces matériels d'échantillonnage permettront d'obtenir des informations précises sur la composition de l'air lors d'un « fume event » grâce à la formation en amont des membres d'équipage à leur utilisation. Après une large étude bibliographique autour du « syndrome aérotoxique », ce travail présente donc les différents polluants recensés jusqu'alors dans l'air et dans les huiles moteurs, ainsi que les méthodes d'échantillonnages utilisées. Cette synthèse nous permet alors de proposer un ensemble de moyens de mesure adaptés pour la réalisation d'une campagne de prélèvements par les membres d'équipages pendant les « fume events ».

MOTS-CLÉS

Syndrome aérotoxique (Aerotoxic syndrom)
Événement de contamination de l'air (Fume event)
Cabine d'avion (Aircraft cabin)
Qualité de l'air (Air quality)
Air contaminé (Contaminated air)
Air de prélèvement (Bleed air)
Organophosphoré (Organophosphate)
Huile moteur (Engine oil / Jet oil)
Air intérieur (Indoor Air)

JURY

M. GUITTON Jérôme, Professeur
M. MULLOT Jean-Ulrich, Professeur agrégé du Val-de-Grâce
M. RENARD Christophe, Professeur agrégé du Val-de-Grâce

DATE DE SOUTENANCE

Jeudi 14 Décembre 2017

ADRESSE DE L'AUTEUR

331 Avenue du Général de Gaulle, 69500 Bron