



**HAL**  
open science

# Évaluation de l'exposition professionnelle aux polluants des fumées de combustion de bois chez des pompiers formateurs intervenant dans une structure de feu contrôlé

Pauline Zangl

► **To cite this version:**

Pauline Zangl. Évaluation de l'exposition professionnelle aux polluants des fumées de combustion de bois chez des pompiers formateurs intervenant dans une structure de feu contrôlé. Médecine humaine et pathologie. 2023. dumas-04279507

**HAL Id: dumas-04279507**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04279507v1>**

Submitted on 10 Nov 2023

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

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

## AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance.

La propriété intellectuelle du document reste entièrement celle du ou des auteurs. Les utilisateurs doivent respecter le droit d'auteur selon la législation en vigueur, et sont soumis aux règles habituelles du bon usage, comme pour les publications sur papier : respect des travaux originaux, citation, interdiction du pillage intellectuel, etc.

Il est mis à disposition de toute personne intéressée par l'intermédiaire de [l'archive ouverte DUMAS](#) (Dépôt Universitaire de Mémoires Après Soutenance).

Si vous désirez contacter son ou ses auteurs, nous vous invitons à consulter en ligne les annuaires de l'ordre des médecins, des pharmaciens et des sages-femmes.

Contact à la Bibliothèque universitaire de Médecine Pharmacie de Grenoble :

[bump-theses@univ-grenoble-alpes.fr](mailto:bump-theses@univ-grenoble-alpes.fr)

Année : 2023

**ÉVALUATION DE L'EXPOSITION PROFESSIONNELLE  
AUX POLLUANTS DES FUMÉES DE COMBUSTION DE BOIS  
CHEZ DES POMPIERS FORMATEURS INTERVENANT  
DANS UNE STRUCTURE DE FEU CONTRÔLÉ**

THÈSE

POUR LE DIPLÔME D'ÉTAT DE DOCTEUR EN MÉDECINE

SPÉCIALITÉ : MÉDECINE DU TRAVAIL

SOUTENUE PUBLIQUEMENT À LA FACULTÉ DE MÉDECINE DE GRENOBLE

Le 25/10/2023

Par Mme Pauline ZANGL

*[Données à caractère personnel]*

DEVANT LE JURY COMPOSÉ DE :

Président du jury :

M. le Pr Arnaud SEIGNEURIN

Membres :

M. le Pr Vincent BONNETERRE (directeur de thèse)

M. le Dr Renaud PERSOONS

M. le Dr Clément COLLART

*L'UFR de Médecine de Grenoble n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans les thèses ; ces opinions sont considérées comme propres à leurs auteurs.*

CORPS	NOM Prénom	DISCIPLINE UNIVERSITAIRE
PU-PH	ALBALADEJO Pierre	Anesthésiologie-réanimation et médecine péri-opératoire
PU-PH	ARVIEUX-BARTHÉLÉMY Catherine	Chirurgie viscérale et digestive
PU-PH	BAILLET Athan	Rhumatologie
MCU-PH	BAILLIEUL Sébastien	Physiologie
PU-PH	BARONE-ROCHETTE Gilles	Cardiologie
PR Attaché	BARTH Johannes	Chirurgie de l'épaule et du genou
PU-PH	BAYAT Sam	Physiologie
PR Ass.MG	BENDAMENE Farouk	Médecine Générale
PU-PH	BENHAMOU Pierre-Yves	Endocrinologie, diabète et maladies métaboliques
PU-PH	BERGER François	Biologie cellulaire
MCU-PH	BÉTRY Cécile	Nutrition
MCU-PH	BIDART-COUTTON Marie	Biologie cellulaire
PU-PH	BIOULAC-ROGIER Stéphanie	Pédopsychiatrie ; addictologie
PU-PH	BLAISE Sophie	Chirurgie vasculaire ; médecine vasculaire
MCU-PH	BOISSET Sandrine	Bactériologie-virologie ; Hygiène hospitalière
PU-PH émérite	BONAZ Bruno	Gastroentérologie ; hépatologie
PU-PH	BONNETERRE Vincent	Médecine et santé au travail
PU-PH	BOREL Anne-Laure	Nutrition
PU-PH	BOSSON Jean-Luc	Biostatistiques, informatique médicale et technologies de communication
MCU-PH émérite	BOTTARI Serge	Biologie cellulaire
PU-PH	BOUDISSA Mehdi	Chirurgie orthopédique et traumatologique
PU-PH	BOUGEROL Thierry	Psychiatrie d'adultes
PU-PH	BOUILLET Laurence	Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement ; addictologie
MCU-PH	BOUSSAT Bastien	Épidémiologie, économie de la santé et prévention
PU-PH	BOUZAT Pierre	Anesthésiologie-réanimation et médecine péri-opératoire
PU-PH émérite	BRAMBILLA Christian	Pneumologie
PU-PH émérite	BRAMBILLA Elisabeth	Anatomie et cytologie pathologiques
MCU-PH	BRENIER-PINCHART Marie Pierre	Parasitologie et mycologie
PU-PH	BRICAULT Ivan	Radiologie et imagerie médicale
PU-PH émérite	BRICHON Pierre-Yves	Chirurgie thoracique et cardiovasculaire
MCU-PH	BRIOT Raphaël	Thérapeutique-médecine de la douleur ; Addictologie
PU-PH émérite	CAHN Jean-Yves	Hématologie
PU-PH émérite	CARPENTIER Patrick	Chirurgie vasculaire, médecine vasculaire
PR Ass.MG	CARRILLO Yannick	Médecine Générale
MCU-PH	CASPAR Yvan	Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière
PU-PH émérite	CESBRON Jean-Yves	Immunologie
PU-PH	CHABARDÈS Stephan	Neurochirurgie
PU-PH	CHABRE Olivier	Endocrinologie, diabète et maladies métaboliques
PU-PH	CHAFFANJON Philippe	Anatomie

CORPS	NOM Prénom	DISCIPLINE UNIVERSITAIRE
MCF Ass.MG	CHAMBOREDON Benoît	Médecine Générale
PU-PH	CHARLES Julie	Dermato-vénérologie
MCF Ass.MG	CHAUVET Marion	Médecine Générale
PU-PH	CHAVANON Olivier	Chirurgie thoracique et cardiovasculaire
MCU-PH	CHEVALLIER Marie	Pédiatrie
PU-PH	CHIQUET Christophe	Ophthalmologie
PU-PH	CHIRICA Mircea	Chirurgie viscérale et digestive
PU-PH	CINQUIN Philippe	Biostatistiques, informatique médicale et technologies de communication
MCU-PH	CLAVARINO Giovanna	Immunologie
MCU-PH	CLIN CHERPEC Rita	Nutrition
PU-PH	COHEN Olivier	Histologie, embryologie et cytogénétique
PU-PH	COURVOISIER Aurélien	Chirurgie infantile
PU-PH	COUTTON Charles	Génétique
PU-PH	COUTURIER Pascal	Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement ; addictologie
PU-PH	CRACOWSKI Jean-Luc	Pharmacologie fondamentale ; pharmacologie clinique ; addictologie
PU-PH	DEBATY Guillaume	Médecine d'Urgence
PU-PH	DEBILLON Thierry	Pédiatrie
PU-PH	DECAENS Thomas	Gastroentérologie ; hépatologie ; addictologie
PR Attaché	DEFAYE Pascal	Cardiologie
PU-PH	DEGANO Bruno	Pneumologie ; addictologie
PU-PH	DEMATTEIS Maurice	Pharmacologie fondamentale ; pharmacologie clinique ; addictologie
PU-PH émérite	DEMONGEOT Jacques	Biostatistiques, informatique médicale et technologies de communication
MCU-PH	DERANSART Colin	Physiologie
PU-PH	DESCOTES Jean-Luc	Urologie
PU-PH	DETANTE Olivier	Neurologie
MCU-PH	DIETERICH Klaus	Génétique
PU-PH	DJAILEB Loïc	Biophysique et médecine nucléaire
PU-PH	DONDE-COQUELET Clément	Psychiatrie d'adultes
MCU-PH	DOUTRELEAU Stéphane	Physiologie
MCU-PH	DREVET Sabine	Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement ; addictologie
PU-PH	DUMAS Guillaume	Médecine intensive-réanimation
PU-PH	DUMESTRE PÉRARD Chantal	Immunologie
PU-PH	ÉPAULARD Olivier	Maladies infectieuses ; Maladies tropicales
MCU-PH	EVAIN Jean-Noël	Anesthésiologie-réanimation et médecine périopératoire
MCU-PH	EYSSERIC Hélène	Médecine légale et droit de la santé
PU-PH émérite	FAGRET Daniel	Biophysique et médecine nucléaire
PU-PH	FAUCHERON Jean-Luc	Chirurgie viscérale et digestive
PU-PH	FAURE Julien	Biochimie et biologie moléculaire
PU-PH	FERRETTI Gilbert	Radiologie et imagerie médicale
PU-PH	FIARD Gaëlle	Urologie
PU-PH	FONTAINE Éric	Nutrition
PU-PH émérite	FRANÇOIS Patrice	Épidémiologie, économie de la santé et prévention
PR Ass. Méd.	FREY Gil	Chirurgie thoracique et cardiovasculaire
MCU-MG	GABOREAU Yoann	Médecine Générale

CORPS	NOM Prénom	DISCIPLINE UNIVERSITAIRE
PU-PH	GARBAN Frédéric	Hématologie ; Transfusion
PU-PH	GAUDIN Philippe	Rhumatologie
MCU-PH	GAUTIER-VEYRET Elodie	Pharmacologie fondamentale ; pharmacologie clinique ; addictologie
PU-PH	GAVAZZI Gaëtan	Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement ; addictologie
PU-PH	GAY Emmanuel	Neurochirurgie
MCU-PH	GIAI Joris	Biostatistiques, informatique médicale et technologies de communication
MCU-PH	GILLOIS Pierre	Biostatistiques, informatique médicale et technologies de communication
PU-PH	GIOT Jean-Philippe	Chirurgie plastique, reconstructrice et esthétique ; Brûlologie
MCF Ass.MG	GIRARD Pauline	Médecine Générale
MCU-PH	GRAND Sylvie	Radiologie et imagerie médicale
PU-PH émérite	GRIFFET Jacques	Chirurgie infantile
PU-PH	HAINAUT Pierre	Biochimie et biologie moléculaire
PU-PH émérite	HALIMI Serge	Nutrition
PU-PH	HENNEBICQ Sylviane	Biologie et médecine du développement et de la reproduction ; gynécologie médicale
PR Ass. Méd.	HODAJ Hasan	Thérapeutique-médecine de la douleur
PU-PH	HOFFMANN Pascale	Gynécologie-obstétrique ; gynécologie médicale
PU-PH émérite	HOMMEL Marc	Neurologie
PU-MG	IMBERT Patrick	Médecine Générale
PU-PH émérite	JOUK Pierre-Simon	Génétique
PU-PH	JOUVE Thomas	Néphrologie
PU-PH	KAHANE Philippe	Physiologie
PU-PH	KASTLER Adrian	Radiologie et imagerie médicale
MCU-PH	KHERRAF Zine-Eddine	Biologie et médecine du développement et de la reproduction ; gynécologie médicale
PU-PH	KRAINIK Alexandre	Radiologie et imagerie médicale
PU-PH	LABARÈRE José	Épidémiologie, économie de la santé et prévention
PU-PH	LABLANCHE (CORNALI) Sandrine	Endocrinologie, diabète et maladies métaboliques
PU-PH	LANDELLE Caroline	Bactériologie – virologie ; Hygiène hospitalière
PU-PH	LANTUEJOUL Sylvie	Anatomie et cytologie pathologiques
PR Ass. Méd.	LARAMAS Mathieu	Cancérologie ; radiothérapie
MCU-PH	LARDY Bernard	Biochimie et biologie moléculaire
PU-PH	LAURENT-COSTENTIN Charlotte	Gastroentérologie ; hépatologie ; addictologie
MCU-PH	LE GOUËLLEC LE PISSART Audrey	Biochimie et biologie moléculaire
MCU-PH	LE MARÉCHAL Marion	Maladies infectieuses ; maladies tropicales
PU-PH	LECCIA Marie-Thérèse	Dermato-vénéréologie
PR Ass.MG	LEDOUX Jean-Nicolas	Médecine Générale
PU-PH émérite	LETOUBLON Christian	Chirurgie viscérale et digestive
PU-PH émérite	LEVY Patrick	Physiologie
PU-PH	LONG Jean-Alexandre	Urologie
MCU-PH	LUPO Julien	Bactériologie-virologie ; Hygiène hospitalière
MCU-PH	MARLU Raphaël	Hématologie ; Transfusion
PR Ass. Méd.	MATHIEU Nicolas	Gastroentérologie ; hépatologie ; addictologie
MCU-PH	MAUBON Danièle	Parasitologie et mycologie
PU-PH	MAURIN Max	Bactériologie-virologie ; Hygiène hospitalière
MCU-PH	MC LEER Anne	Histologie, embryologie et cytogénétique

CORPS	NOM Prénom	DISCIPLINE UNIVERSITAIRE
MCU-PH	MEONI Sara	Neurologie
MCU-PH	MEONI Sara	Neurologie
MCU-PH	MEUNIER Mathieu	Hématologie ; Transfusion
PR Ass. Méd.	MICHY Thierry	Gynécologie-obstétrique
MCU-PH	MONDET Julie	Histologie, embryologie et cytogénétique
PU-PH	MORAND Patrice	Bactériologie-virologie ; Hygiène hospitalière
PU-PH	MOREAU-GAUDRY Alexandre	Biostatistiques, informatique médicale et technologies de communication
PU-PH	MORO Elena	Neurologie
PU-PH	MORO-SIBILOT Denis	Pneumologie ; addictologie
PU-PH	MORTAMET Guillaume	Pédiatrie
PU-PH émérite	MOUSSEAU Mireille	Cancérologie ; radiothérapie
PU-PH émérite	MOUTET François	Chirurgie plastique, reconstructrice et esthétique ; brûlologie
PR Ass.MG	ODDOU Christel	Médecine Générale
MCU-PH	PACLET Marie-Hélène	Biochimie et biologie moléculaire
PU-PH	PAILHÉ Régis	Chirurgie orthopédique et traumatologie
PU-PH	PALOMBI Olivier	Anatomie
PU-PH	PARK Sophie	Hématologie ; Transfusion
PR Ass.MG	PAUMIER-DESBRIÈRES Françoise	Médecine Générale
PU-PH	PAYEN DE LA GARANDERIE Jean-François	Anesthésiologie-réanimation et médecine péri-opératoire
MCU-PH	PAYSANT François	Médecine légale et droit de la santé
MCU-PH	PELLETIER Laurent	Biologie cellulaire
PU-PH	PELLOUX Hervé	Parasitologie et mycologie
PU-PH	PÉPIN Jean-Louis	Physiologie
PU-PH	PÉRENNOU Dominique	Médecine physique et de réadaptation
PAST	PICARD Julien	Anesthésiologie-réanimation et médecine péri-opératoire
PU-PH	PERNOD Gilles	Chirurgie vasculaire ; Médecine vasculaire
MCF	PINSAULT Nicolas	Sciences de la rééducation et de réadaptation
PU-PH	PIOLAT Christian	Chirurgie infantile
PU-PH émérite	PISON Christophe	Pneumologie ; Addictologie
PU-PH émérite	PLANTAZ Dominique	Pédiatrie
PU-PH	POIGNARD Pascal	Bactériologie-virologie ; Hygiène hospitalière
PU-PH émérite	POLACK Benoît	Hématologie ; Transfusion
PU-PH	POLOSAN Mircea	Psychiatrie d'adultes ; Addictologie
MCU-PH	RABATTU Pierre-Yves	Anatomie
PU-PH émérite	RAMBEAUD Jean-Jacques	Urologie
PU-PH	RAY Pierre	Biologie et médecine du développement et de la reproduction ; gynécologie médicale
MCU-PH	RENDU John	Biochimie et biologie moléculaire
MCU-PH émérite	RIALLE Vincent	Biostatistiques, informatique médicale et technologies de communication
PU-PH	RIETHMULLER Didier	Gynécologie-obstétrique ; gynécologie médicale
PU-PH	RIGHINI Christian	Oto-rhino-laryngologie
PU-PH émérite	ROMANET Jean Paul	Ophthalmologie
PU-PH	ROSTAING Lionel	Néphrologie
PU-PH	ROUSTIT Matthieu	Pharmacologie fondamentale ; pharmacologie clinique ; addictologie

CORPS	NOM Prénom	DISCIPLINE UNIVERSITAIRE
MCU-PH	ROUX-BUISSON Nathalie	Biochimie et biologie moléculaire
PR Ass.MG	ROYER DE VÉRICOURT Guillaume	Médecine Générale
PU-PH émérite	SARAGAGLIA Dominique	Chirurgie orthopédique et traumatologie
MCU-PH	SATRE Véronique	Génétique
PU-PH	SAUDOU Frédéric	Biologie cellulaire
PU-PH	SCHMERBER Sébastien	Oto-rhino-laryngologie
PU-PH	SCHWEBEL Carole	Médecine intensive-réanimation
PU-PH	SCOLAN Virginie	Médecine légale et droit de la santé
PU-PH	SEIGNEURIN Arnaud	Épidémiologie, économie de la santé et prévention
PU-PH	SPEAR Rafaëlle	Chirurgie vasculaire ; médecine vasculaire
PU-PH émérite	STAHL Jean-Paul	Maladies infectieuses ; Maladies tropicales
PU-PH	STANKE Françoise	Pharmacologie fondamentale ; pharmacologie clinique ; addictologie
MCU-PH	STASIA Marie-José	Biochimie et biologie moléculaire
PU-PH	STURM Nathalie	Anatomie et cytologie pathologiques
PU-PH	TAMISIER Renaud	Physiologie
PU-PH	THEVENON Julien	Génétique
PU-PH	TOFFART Anne-Claire	Pneumologie ; Addictologie
PU-PH	TONETTI Jérôme	Chirurgie orthopédique et traumatologie
PU-PH	TOUSSAINT Bertrand	Biochimie et biologie moléculaire
PU-PH	VALMARY-DEGANO Séverine	Anatomie et cytologie pathologiques
PU-PH	VANZETTO Gérald	Cardiologie
PU-PH	VIGLINO Damien	Médecine d'urgence
PU-PH émérite	ZARSKI Jean-Pierre	Gastroentérologie ; hépatologie ; addictologie

PU-PH	Professeur des universités - Praticien hospitalier
MCU-PH	Maître de conférences des universités - Praticien hospitalier
PU-PH émérite*	Professeur des universités - Praticien hospitalier émérite
MCU-PH émérite*	Maître de conférences des universités - Praticien hospitalier émérite
PU-MG	Professeur des universités de médecine générale
MCU-MG	Maître de conférences des universités de médecine générale
MCF	Maître de conférences des universités
PR Ass. Med.	Professeur des universités associé (à mi-temps)
PR Ass. MG	Professeur des universités de médecine générale associé (à mi-temps)
MCF Ass.MG	Maître de conférences des universités de médecine générale associé (à mi-temps)
PAST	Professeur associé en service temporaire
PR Attaché	Professeur Attaché

## Table des matières

REMERCIEMENTS.....	9
ABRÉVIATIONS .....	12
INTRODUCTION.....	14
Présentation du SDIS 38.....	14
Le SDIS 38 : effectifs et missions .....	14
Le SSSM : effectifs et missions.....	15
Présentation du Centre de Formation Départemental et du Plateau Technique n°2 .....	15
Les formateurs sapeurs-pompiers .....	18
Problématique de l'étude .....	19
Hypothèses de recherche .....	22
Article : Évaluation de l'exposition professionnelle aux polluants des fumées de combustion de bois chez des pompiers formateurs intervenant dans une structure de feu contrôlé .....	24
RÉSUMÉ .....	24
INTRODUCTION.....	27
MATÉRIEL ET MÉTHODES .....	29
Population étudiée .....	29
Les vidéos des pratiques professionnelles .....	30
Les prélèvements atmosphériques .....	30
Les prélèvements surfaciques cutanés .....	31
Les prélèvements urinaires.....	32
Les analyses statistiques .....	32
RÉSULTATS .....	33
Caractéristiques de la population .....	33
Analyse vidéo des pratiques professionnelles .....	34
Poste OTR.....	34
Poste Pilote .....	34
Poste RESPEX .....	35
Prélèvements d'ambiance atmosphériques .....	36
Prélèvements surfaciques cutanés .....	40
Prélèvements urinaires .....	47
Concentrations du métabolite du Benzène (S-PMA) .....	47

Concentrations du métabolite du Pyrène (1-OHP) .....	49
Concentrations du métabolite du Benzo(a)pyrène (3-OHBP) .....	51
Concentrations des métabolites du Fluorène (2 et 3-OHFluo) .....	52
Concentrations des métabolites des Phénanthrènes (2 et 3-OHPhen).....	53
DISCUSSION .....	55
Forces de l'étude .....	59
Faiblesses de l'étude .....	59
Recommandations pour le SDIS 38 .....	61
CONCLUSION .....	62
BIBLIOGRAPHIE .....	64
ANNEXES.....	68

## REMERCIEMENTS

Au Professeur Vincent BONNETERRE, pour son aide dans la réalisation de mon projet professionnel.

Au Docteur Renaud PERSOONS, pour son temps, sa bonne humeur et son accompagnement dans ce long travail universitaire.

Au Professeur Arnaud SEIGNEURIN, de me faire l'honneur d'être le président de mon jury.

Au Docteur Clément COLLART, pour son investissement dans ce travail, sa disponibilité et son soutien.

Aux agents du SDIS38, qui ont participé à ce travail, merci de votre accueil, vos explications de votre volontariat.

Au SSSM et au médecin chef le Dr Christophe ROUX, qui m'a proposé ce travail, m'a permis de faire une étude intéressante qui permettra de faire mieux connaître le « monde pompier ».

A la colonelle Sandrine GONDRAND et au capitaine Benoit GONON pour leur aide et implication à mener à terme ce travail.

A Sarah MONTLEVIER, laborantine du CHU pour son aide et ses déplacements à la côte Saint-André.

A Franck BALDUCCI pour les nombreux tests statistiques réalisés.

A Olivier CULIE pour son aide au codage des vidéos.

A toutes les personnes des services qui m'ont accueillie en stage au cours de l'internat :

Les Urgences adultes de Voiron pour votre dévotion et bienveillance malgré les difficultés et le flux de patients toujours plus nombreux.

La MTPH du CHU et le laboratoire TPE pour les maladies rares, la recherche et nombreux tableurs Excel.

Le SSR rhumatologique d'Uriage, remerciements spéciaux aux coachs sportifs (Delphine, Maité, Franck et Elie), à Baptiste meilleur externe, Sophie qui grâce à elle le myélome n'a plus de secret pour moi !

Sans oublier Myriam pour m'avoir permis d'utiliser son bureau.

A PST38 avec Florence, Anne, Astrid et Laureen pour votre bonne ambiance.

Aux psychiatres de la Clinique du Dauphiné merci à Grégoire pour ton sérieux rôle de chef. A Claire de m'avoir prise sous son aile, à Fatiha d'avoir supporté mes blagues douteuses.

Au Répsy qui m'a permis de découvrir un peu plus le monde de la santé mentale.

Et enfin à l'ensemble de l'équipe du service autonome de prévention et de santé au travail de Schneider Electric, merci à Hélène (Marco-Polo), à Naoua pour partager mon sens de l'humour et surtout à Sylvaine pour ta bienveillance et ta gentillesse.

Vous m'avez tous tant appris, encore une fois merci à tous !

A mes co-internes :

A Méli pour nos soirées endiablées toujours prête à danser jusqu'au bout de la nuit. (Ps : tu es sûre que tu connais le chemin ??)

A Catoche pour nos longues discussions en randonnées, une belle amitié est née.

A Kourosh pour nos repas geek et ton humour sensationnel.

A Tommy sans toi je ne serais jamais arrivée à l'heure du semestre.

A Ays pour nous avoir fait réviser le malaise vagal au premier jour de stage !

A Mama Marianne qui m'a guidé tout au long de l'internat.

A Barbara et Jérémy pour d'une part l'initiation au véganisme et la passion geek.

A Julie et Dadjia pour nos moments partagés entre amis.

Et enfin à mes parents, mes sœurs Loulou et Eva, mon frère Hugo, ma cousine Lucie, mes meilleurs amis Anne-Lise, Samia et Maxime, mes amis Bregeon, Clara, Rimma, Thibault et Tanguy, ma belle-famille, mais surtout à ma compagne Loïse qui a rédigé l'ensemble de la bibliographie et fait la mise en page de la thèse.

Mille merci pour votre soutien tout au long de ces longues années d'études, sans vous rien n'aurait été possible.

Je vous aime

# ABRÉVIATIONS

## Introduction :

ARI : Appareil Respiratoire Isolant

BaP : Benzo(a)pyrène

CIRC : Centre International de Recherche sur le Cancer

COEPT : Caisson d'Observation et d'Etude des Phénomènes Thermiques

COV : Composés Organiques Volatiles

EPI : Equipement de Protection Individuel

EPR : Equipement de Protection Respiratoire

FF : Firefighter

HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

LNH : Lymphome Non Hodgkinien

PATS : Personnels Administratifs Techniques et Spécialisés

PLT2 : Plateau Technique n°2

SAMU : Service d'Aide Médicale Urgente

SBEP : Surveillance Biologique des Expositions Professionnelles

SCT : Surface Corporelle Totale

SDIS 38 : Service Départemental d'Incendie et de Secours de l'Isère

SMV : Simulateur Multi Volume

SP : Sapeurs-Pompiers

SPP : Sapeurs-Pompiers Professionnels

SPV : Sapeurs-Pompiers Volontaires

SSSM : Service de Santé et de Secours Médical

Matériel et Méthode :

DIREX : Directeur d'Exercice

OTR : Outils Taille Réelle

RESPEX : Responsable d'Exercice

Résultats :

DP : Début de Poste

FP : Fin de Poste

FP+16h : Fin de poste plus 16 heures

LQ : Limite of Quantification

OEL : Occupational Exposure Limit

Discussion :

CSS : Conseil Supérieur de la Santé

# INTRODUCTION

## Présentation du SDIS 38

### Le SDIS 38 : effectifs et missions

Le Service départemental d'incendie et de Secours de l'Isère (SDIS 38) est un service départemental public autonome sous l'autorité conjointe sur le plan administratif de la présidente du Conseil d'Administration et sur le plan opérationnel sous l'autorité du Préfet de l'Isère (1).

Le SDIS 38 s'étend sur l'ensemble du territoire de l'Isère, il compte 112 casernes et 22 centres, l'État-major est situé à Fontaine. Le SDIS 38 comporte 5 419 agents dont 4 330 sapeurs-pompiers volontaires, 820 sapeurs-pompiers professionnels et 269 Personnels Administratifs Techniques et Spécialisés (PATS). Ces agents sont répartis en deux groupements, au nord (siège à Vienne) et au sud (siège à Seyssinet-Pariset). Les agents professionnels du SDIS 38 sont tous des fonctionnaires de la fonction publique territoriale (2).

Les SDIS ont pour missions exclusives « la prévention, la protection, la lutte contre les incendies ainsi que la prévention et l'évaluation des risques de sécurité civile ». Certaines missions ne sont pas des missions exclusives du SDIS telles que « la préparation des mesures de sauvegarde et l'organisation des moyens de secours, la protection des personnes, des biens et de l'environnement ; les secours d'urgences aux victimes d'accidents, lutte contre les catastrophes et évacuation des victimes » (1,3). Les activités du SDIS 38 sont diverses, en 2021 on dénombre 80 757 interventions (+10,60% par rapport à 2020) dont 64 077 secours à personnes, 5 960 incendies, 4 431 opérations diverses, 5 185 accidents de la voie publique et 1 104 risques technologiques (1,4).

## Le SSSM : effectifs et missions

Le SDIS 38 possède son propre service de prévention et santé au travail appelé Service de Santé et de Secours Médical (SSSM). Ce service est sous l'autorité du médecin chef qui coordonne une équipe pluridisciplinaire. Il est secondé par un médecin chef adjoint (5). L'équipe pluridisciplinaire du SSSM de l'Isère est composée de 51 médecins sapeurs-pompiers volontaires et 2 médecins sapeurs-pompiers professionnels, 5 pharmaciens sapeurs-pompiers volontaires et 1 pharmacien sapeurs-pompiers professionnel, 171 infirmiers sapeurs-pompiers volontaires et 10 infirmiers sapeurs-pompiers professionnels, 4 vétérinaires sapeurs-pompiers volontaires et 2 psychologues sapeurs-pompiers volontaires, 1 coordinateur administratif et médical, 7 assistantes administratives et 2 logisticiens et 1 ingénieur biomédical (6).

Les missions propres du SSSM sont diverses. Il est soumis aux mêmes exigences que les services de prévention et santé au travail qui sont : l'aptitude, le suivi et la surveillance de l'état de santé des sapeurs-pompiers volontaires ou professionnels ainsi que la prévention des risques professionnels. Le SSSM participe également au soutien sanitaire et opérationnel ainsi qu'à la formation secourisme des Sapeurs-Pompiers (SP), tout en assurant la maintenance des équipements et dispositifs médicaux. Le SSSM participe à la prise en charge et l'organisation des secours et soins d'urgence préhospitaliers. Les soins d'urgences préhospitaliers sont une mission partagée avec différents acteurs notamment le Service d'Aide Médicale Urgente (SAMU) (1,7). Le SSSM assure les opérations de secours qui impliquent des animaux ou des chaînes alimentaires, ainsi que des missions de prévision, prévention et intervention des risques naturels et technologiques.

## Présentation du Centre de Formation Départemental et du Plateau Technique n°2

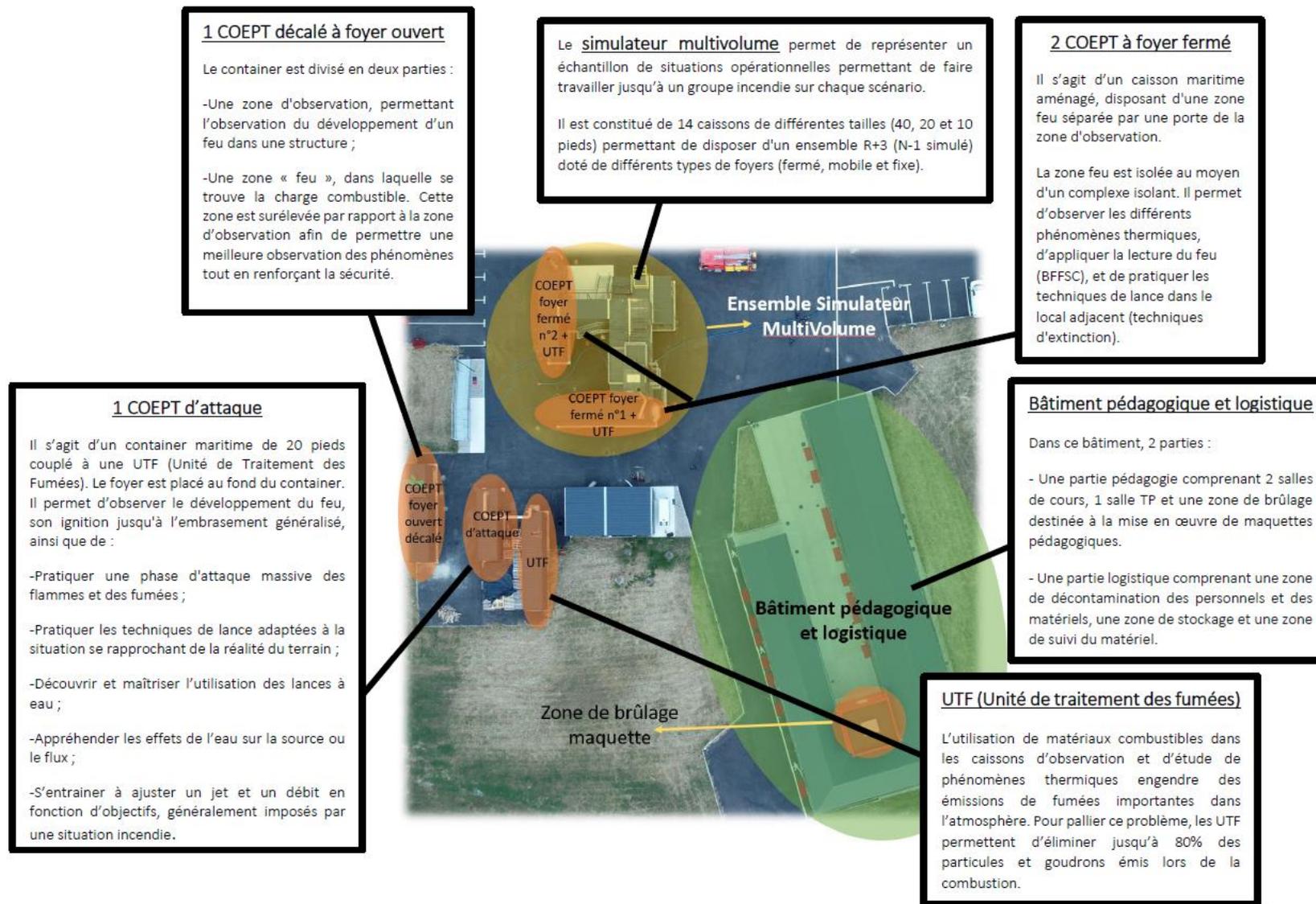
Le Plateau Technique n°2 (PLT2) est situé à la Côte-Saint-André. Il fait partie du site du Centre de Formation Départemental (CFD) qui propose tout type de formations incendie ou de secours. Le PLT2 a été inauguré en septembre 2021 pour

la formation des formateurs SP, et est exploité pour la formation de stagiaires depuis janvier 2022. La mise en place de Caissons d'Observation et d'Entraînements aux Phénomènes Thermiques (COEPT) fait suite au rapport « Pourny » publié en 2003 qui a étudié la sécurité des SP lors de tout type d'intervention. Ce rapport a posé les bases et les actions à entreprendre par les SDIS de France pour développer une culture d'hygiène et de sécurité. Il a mis en évidence la nécessité de formations continues opérationnelles pour tout SP (8).

Le CFD permet un large choix de scénarii et donc de co-expositions variables avec des environnements divers, comme des exercices au sein d'un bâtiment de type hôpital ou garage ou encore d'un véhicule. Les exercices de feu sont créés à partir de palettes de bois non traitées, ce qui expose les formateurs à des fumées chaudes. D'autres sites de formations incendie utilisent comme combustibles du bois aggloméré, des mousses, des résines et du plastique (8).

Figure 1 : Plan du PLT2 du GFOR du SDIS 38 – archives internes du SDIS 38

1 COEPT : Caisson d'Observation et d'entraînements aux Phénomènes thermiques



## Les formateurs sapeurs-pompiers

Les SP sont rarement exposés aux fumées d'incendie puisque l'activité d'extinction de feu ne représente que 5% de la totalité des interventions (9). En revanche les formateurs de sapeurs-pompiers y sont exposés par leur double activité opérationnelle et de formation. Le temps de travail d'un SP est décompté à partir du déclenchement de l'intervention jusqu'à la fin de celle-ci. Selon le règlement intérieur de 2022 du SDIS 38 relatif au temps de travail des Sapeurs-Pompiers Professionnels (SPP), un pompier professionnel réalise par an 1 607 heures au maximum (10). Si l'on considère que l'activité incendie représente 5% de son activité totale on peut en déduire qu'il passe 80,35 heures par an à la lutte contre le feu sans compter son temps dédié à la formation.

Le SDIS 38 comporte 53 formateurs incendie répartis en 48 SPP et 5 Sapeurs-Pompiers Volontaires (SPV) qui partagent leur temps à parts égales entre les formations en simulation réelle de feu et une activité opérationnelle en caserne. Chaque formateur possède un « carnet de brûlage » dans lequel il doit noter l'ensemble de ses exercices de brûlage. Des mesures préventives ont été prises afin de limiter l'exposition professionnelle des formateurs. Ces mesures de prévention reposent sur des connaissances empiriques et sont les suivantes :

- Pas de formation incendie plus de trois jours consécutifs
- Limitation à six feux le nombre de brûlages maximum sur 15 jours
- Limitation à deux feux le nombre maximum de brûlages par jour et par agent
- Limitation à 30 journées de brûlage par an sur le PLT2 par formateur
- Chaque formateur réalise sa visite périodique tous les deux ans pour un âge compris entre 18 et 38 ans. En dehors de ces âges, la périodicité est annuelle conformément à l'arrêté du 6 mai 2000 modifié (11). La visite périodique se compose d'un examen clinique complet, de mesures biométriques (tensionnelle, fréquence cardiaque, poids, taille) et d'une spirométrie.

## **Problématique de l'étude**

L'exposition professionnelle en tant que SP a été récemment classée comme cancérogène avéré par le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) (12), avec un niveau de preuve suffisant pour le mésothéliome pleural (risque accru de 58% par rapport à la population générale) (13,14) et le cancer de la vessie (risque accru de 16%), en lien avec des expositions plausibles à l'amiante et aux Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) (14). Le niveau de preuve pour les autres cancers (colon, prostate, testicules, mélanome, LNH) est plus limité en raison de possibles sur-détections du fait d'une surveillance médicale renforcée ainsi que de possibles biais liés aux caractéristiques physiques, au mode de vie, aux pratiques professionnelles, aux Equipements de Protection Individuelle (EPI) qui diffèrent d'un pays à l'autre dans cette étude internationale. Nous joignons ci-après le tableau issu de la monographie du CIRC présentant la méta-analyse sur les risques des cancers chez les SP (12). Parallèlement, un bon niveau de preuve mécanistique est également mis en évidence, avec des effets génotoxiques, des effets épigénétiques, une altération de l'expression des mARN et du stress oxydatif (15).

Table 1 : Meta-rate ratios for selected cancers in male career firefighters compared with a general, uniformed service, or working population referent. IARC Working Group on the Identification of Carcinogenic Hazards to Humans. Occupational exposure as a firefighter Vol. 132 [Internet]. IARC; 2023 p. 523. Disponible sur: <https://publications.iarc.fr/615>

Outcome	No. of studies <sup>a</sup>	Meta-rate ratio <sup>b</sup> (95% CI)	I <sup>2</sup> <sup>c</sup> (%)	Q P value	τ <sup>2</sup>
<i>Incidence (SIR, RR, HR)</i>					
All cancers (C00–C95)	14	1.05 (0.99–1.11)	87	< 0.01	0.008
Stomach (C16)	12	1.00 (0.87–1.15)	33	0.12	0.002
Colon (C18)	10	1.19 (1.07–1.32)	37	0.11	0.007
Lung (C33–C34)	14	0.85 (0.75–0.96)	78	< 0.01	0.032
Melanoma (C43)	12	1.36 (1.15–1.62)	83	< 0.01	0.062
Mesothelioma (C45)	7	1.58 (1.14–2.20)	8	0.36	0.009
Prostate (C61)	14	1.21 (1.12–1.32)	81	< 0.01	0.015
Testis (C62)	11	1.37 (1.03–1.82)	56	0.01	0.084
Kidney (C64–C66)	12	1.09 (0.92–1.29)	55	0.01	0.035
Bladder (C67–C68)	10	1.16 (1.08–1.26)	0	0.71	0
Brain and nervous (C47, C70–C72)	11	1.01 (0.86–1.18)	5	0.40	0.003
Thyroid (C73)	10	1.28 (1.02–1.61)	40	0.09	0.055
Non-Hodgkin lymphoma (C82–C85)	13	1.12 (1.01–1.25)	0	0.51	0.007
<i>Mortality (SMR, RR)<sup>d</sup></i>					
All cancers (C00–C95)	18	0.96 (0.88–1.06)	87	< 0.01	0.026
Stomach (C16)	13	1.05 (0.87–1.28)	41	0.06	0.045
Colon (C18)	9	1.03 (0.78–1.37)	63	< 0.01	0.079
Lung (C33–C34)	12	0.96 (0.86–1.06)	55	0.01	0.008
Melanoma (C43)	4	1.05 (0.48–2.30)	0	0.43	0.093
Mesothelioma (C45)	3	1.75 (0.83–3.69)	0	0.56	0
Prostate (C61)	11	1.07 (0.95–1.20)	30	0.16	0
Kidney (C64–C66)	9	1.10 (0.66–1.83)	53	0.03	0.199
Bladder (C67–C68)	9	1.22 (0.70–2.11)	67	< 0.01	0.267
Brain and nervous (C47, C70–C72)	11	1.33 (0.98–1.79)	53	0.02	0.098
Thyroid (C73)	4	1.90 (0.36–10.00)	58	0.07	0.671
Non-Hodgkin lymphoma (C82–C85)	5	1.20 (1.03–1.40)	0	0.74	0

CI, confidence interval; HR, hazard ratio; RR, rate ratio; SIR, standardized incidence ratio; SMR, standardized mortality ratio.

<sup>a</sup> Results from the studies by [Daniels et al. \(2014\)](#) and [Pinkerton et al. \(2020\)](#) included a small number of women. [Peterson et al. \(2018a\)](#) included part-time/volunteer firefighters for cancers of the kidney, stomach, thyroid, and brain, and for mesothelioma. Some results from overlapping study populations were excluded.

<sup>b</sup> Random-effects models were used with between-study variance estimated using the restricted maximum-likelihood estimator. Hartung–Knapp–Sidik–Jonkman (HKSJ) adjustments and an ad hoc variance correction (using wider confidence intervals) were used to calculate confidence intervals.

<sup>c</sup> See Figure 1 in [DeBono et al. \(2023\)](#) for individual study results and generic inverse-variance meta-analysis statistics. The variance of individual study estimates was based on the reported confidence interval bounds and may differ from estimates obtained using exact methods when there are few cases.

<sup>d</sup> Outcomes with fewer than three available studies were not meta-analysed.

From [DeBono et al. \(2023\)](#), [CC-BY-3.0](#).

Il est donc nécessaire d'évaluer les risques sanitaires dans cette catégorie professionnelle, notamment par une surveillance des expositions professionnelles. Ces dernières peuvent être très variées et complexes en fonction des caractéristiques des combustions (bâtiments, mobiliers, forêt) à l'origine d'émissions variables (HAP, benzène, toluène, éthylbenzène, xylène, métaux, retardateurs de flamme, etc). De nombreuses études ont évalué la composition et les concentrations de polluants dans l'air lors d'incendies, permettant de caractériser les principaux polluants émis en fonction de la nature du combustible (16). Néanmoins, ces études ne reflètent pas l'exposition professionnelle des SP dans la mesure où ceux-ci sont protégés des fumées par leur tenue de feu et leurs EPI incluant un Appareil Respiratoire Isolant (ARI), un casque et des gants. Cependant les pratiques professionnelles et les EPI peuvent différer selon le pays de l'étude. Il est donc nécessaire d'utiliser d'autres stratégies pour évaluer les expositions professionnelles, notamment la Surveillance Biologique des Expositions Professionnelles (SBEP).

Une revue de la littérature d'avril 2023 a synthétisé les études de biosurveillance professionnelle chez les SP. Elle met en évidence des expositions professionnelles systématiques aux HAP (d'intensité variable), notamment aux HAP légers (naphtalène, fluorène, phénanthrène, pyrène), avec des concentrations significativement supérieures en fin de poste à celles de début de poste (17). En revanche, peu d'études ont mesuré les métabolites des HAP cancérogènes tels que le Benzo(a)Pyrène (BaP). Une étude française menée par le service médical de la brigade des sapeurs-pompiers de Paris en 2019 a mis en évidence une faible contamination aux HAP et au benzène de formateurs sur un effectif de 8 SP, avec des concentrations des métabolites des HAP et du benzène largement inférieures aux valeurs maximales recommandées en milieu professionnel, mais une tendance à l'accumulation des métabolites pendant la semaine de travail (18).

Une autre étude a mis en évidence une forte contribution de l'absorption cutanée à l'exposition globale aux HAP chez des SP ainsi qu'une exposition lors des périodes passées sans port d'EPI (19). Enfin des travaux ont confirmé que la contamination des EPI augmente avec l'utilisation et le stockage de tenues non lavées ou de

procédures de nettoyage ou de maintenance inadaptées (20,21).

Ces données ont amené le service médical du SDIS à s'interroger sur les pratiques professionnelles des SP formateurs et sur leur efficacité pour les protéger de la toxicité des fumées de combustion chaude.

## **Hypothèses de recherche**

Plusieurs interrogations sont posées par le service médical du SDIS 38, notamment :

- La tenue (ARI, vêtements, casque, gants) est-elle parfaitement efficace vis-à-vis de l'exposition aux polluants des fumées de combustion ?
- Y a-t-il un risque de contamination cutanée à l'issue des exercices, notamment lors du déshabillage et du nettoyage des surfaces de peau (visage, avant-bras) ainsi que du matériel ?
- Les pratiques individuelles de déshabillage et nettoyage sont-elles différentes entre les formateurs et peuvent-elles être standardisées afin de minimiser les expositions ?

Ces interrogations nous ont conduit à poser les questions suivantes :

- Quel type de surveillance biologique serait pertinent en cas d'exposition aux fumées et réalisable sur le terrain ?
- La contamination cutanée diffère-t-elle selon la région corporelle ?
- La contamination est-elle majoritairement cutanée ou existe-t-il d'autres voies d'expositions (respiratoire ou orale) ?
- L'exposition varie-t-elle selon le poste ?
- Existe-t-il des types d'exercices plus exposant que d'autres ?

Pour répondre à l'ensemble de ces interrogations nous avons décidé de mener cette étude en réalisant :

- Une surveillance biologique de l'exposition basée sur des analyses urinaires en début de poste (concentration témoin), fin de poste (concentration cumulée) et au lendemain matin de l'exercice (pic d'excrétion de certains métabolites) ;
- Des prélèvements superficiels cutanés avec des lingettes sur deux zones distinctes : pourtour du visage et cou ; et au niveau des mains et poignets ;
- Des prélèvements d'air ambiants lors d'un exercice à forte génération de fumée ;
- Des vidéos des pratiques professionnelles durant plusieurs journées sur différents exercices et avec des formateurs différents

Le but de notre étude sera dans un premier temps d'identifier les voies d'exposition des formateurs aux fumées de combustion. Dans un deuxième temps de proposer des recommandations sur les pratiques professionnelles ainsi que sur le suivi médical des formateurs.

# Article : Évaluation de l'exposition professionnelle aux polluants des fumées de combustion de bois chez des pompiers formateurs intervenant dans une structure de feu contrôlé

Auteurs : Pauline Zangl, Renaud Persoons, Vincent Bonneterre

## RÉSUMÉ

Les sapeurs-pompiers de l'Isère bénéficient pour leur formation, depuis 2021, d'un simulateur multi-volumes regroupant une dizaine de conteneurs maritimes permettant de réaliser des exercices comme la progression en conditions réelles, la reconnaissance en milieu enfumé, le sauvetage de victime et l'extinction de foyer. Une évaluation des expositions professionnelles aux produits de combustion est par conséquent rendue nécessaire afin de vérifier la maîtrise des risques pour leur santé et l'efficacité des tenues de protection utilisées.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer le niveau de contamination interne au benzène et aux Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) d'une population de formateurs, au travers d'analyses vidéo des pratiques professionnelles visant à mieux analyser les déterminants significatifs de l'exposition, de métrologies d'ambiances, de prélèvements surfaciques cutanés et d'indicateurs biologiques urinaires d'exposition. L'objectif secondaire est d'identifier les déterminants de l'exposition et d'émettre si nécessaire des recommandations de mesures de prévention et protection.

Une étude observationnelle a été réalisée d'avril à juillet 2023 sur une population de 22 sujets (21 pompiers formateurs incendies et une logisticienne), tous affectés en structure de feu contrôlé. Une analyse vidéo des pratiques professionnelles a été systématiquement réalisée avec le logiciel Captiv®. Des prélèvements d'ambiance d'HAP (particulaires et gazeux) et de particules fines (PM<sub>1</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>) ont été réalisés en parallèle afin de caractériser les aérosols de fumées de combustion. Des prélèvements de surface cutanés (lingettes) ont également été recueillis afin de mesurer les quantités d'HAP retrouvées au niveau du visage et du cou, ainsi que des

maines. L'exposition interne a été mesurée par l'analyse urinaire des métabolites des HAP (1-hydroxypyrene, du 3-hydroxybenzo(a)Pyrène, 2 et 3-hydroxyfluorène et du 2 et 3-hydroxyphénanthrène) et du benzène (acide S-phényl mercapturique).

L'analyse vidéo a permis de mettre en évidence la diversité des pratiques professionnelles (déshabillage de la tenue de feu, nettoyage du matériel, port d'EPI à l'extérieur des conteneurs). Les prélèvements d'air ambiants ont mis en évidence des concentrations importantes de particules fines ( $PM_{10}$ ), dominées par des particules de petite taille ( $PM_{2.5}$  voire  $PM_1$ ). Les HAP sont également retrouvés en concentrations importantes dans l'air autour des conteneurs. Au niveau biologique, alors que les expositions au benzène sont très faibles, celles aux HAP dépassent les seuils maximums recommandés en milieu professionnel chez 9 des 22 sujets étudiés (en particulier chez les OTR et pilotes), et indiquent une absorption cutanée importante. Les prélèvements cutanés par lingettes retrouvent des quantités d'HAP plus importantes chez les deux mêmes catégories d'agents, et une corrélation significative entre les quantités d'HAP mesurés sur la peau (au niveau du visage et du cou) et les concentrations urinaires de certains métabolites des HAP. Le port de gants en nitrile est associé à des quantités significativement plus faibles d'HAP sur les mains en comparaison des autres types de gants (latex, vinyle) ou de l'absence de gants. La prise de douche ou le changement de tenue vestimentaire à midi ne sont pas associés à des concentrations biologiques plus faibles en fin de journée.

Ce travail a donc permis de mettre en évidence une surexposition aux fumées de combustion, notamment HAP, chez une partie de cette population, et la nécessité d'agir sur plusieurs axes pour limiter les risques (tenue de travail, EPI, hygiène, éloignement des zones de repos, limitation de la durée de présence dans les conteneurs, protocoliser les décontaminations de matériels, vérification de l'efficacité des tenues vis-à-vis des particules fines et ultrafines). La prise en compte de ces résultats dans l'adaptation de la surveillance médicale de cette population apparaît importante.

Mots clés : Sapeurs-pompiers ; HAP ; Formateurs ; benzène ; biométrie ; biosurveillance ; épidémiologie

*Afin de faciliter le processus de traduction puis de soumission des articles, les tableaux et les figures éditées automatiquement, sont en anglais.*

## INTRODUCTION

Les sapeurs-pompiers sont soumis à de nombreuses expositions durant leur carrière. Ces expositions sont physiques, chimiques, biologiques et psychologiques. L'exercice de feu est un élément indispensable à la formation des SP, lors de ces entraînements ils sont exposés aux incendies et aux produits de combustions, à l'inhalation des fumées, au risque de brûlure. Ces expositions peuvent avoir à long terme des effets cardiovasculaires, pulmonaires, toxicologiques, cancérigènes ou sur les fonctions endocrines (22). Cette exposition dépend des combustibles et des moyens utilisés pour retarder ou éteindre le feu, tels que les retardateurs de flammes per ou poly-fluorés (23–25). Parmi l'ensemble de ces expositions, certaines ont été étudiées, tandis que d'autres sont encore en cours d'études ou inconnues.

Le Centre International de Recherche contre le Cancer (CIRC) avait classé en 2007 le métier de sapeur-pompier en groupe 2B, c'est-à-dire cancérigène possible. Cette monographie a été revue en 2023 avec un reclassement en groupe 1, cancérigène avéré, pour des excès de risque de mésothéliome et de cancer de la vessie (12).

Les HAP et les Composés Organiques Volatils (COV) dont le benzène font partie des produits de combustion émis lors d'incendies, lesquels sont composés de centaine de substances différentes. Les données de la littérature associent le cancer de la vessie à une exposition aux HAP et le benzène à des leucémies aiguës myéloïdes (26,27). Cette population de formateurs travaillant dans des conditions de caisson de feu est peu étudiée mais présente probablement une exposition majorée comparée à un pompier non formateur. Les données sur les expositions des HAP, du benzène et des COV des formateurs en caisson ont été étudiées par la National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) en 2013. Cette étude indique que des HAP et des COV étaient présents dans l'air des caisses de rangement des tenues de feu. Les produits de combustions ont pu être émis par les tenues de feu après l'exercice. Concernant les expositions biologiques cette étude retrouve des HAP sur la peau du cou des SP portant un type de cagoule qui laisse à découvert la zone du cou. Il a été retrouvé également du benzène et des HAP dans l'haleine exhalé des SP après l'exercice. Et enfin la présence de métabolites des HAP

et du benzène dans les prélèvements urinaires. Cette étude suspecte une absorption majoritairement cutanée des produits de combustion en considérant que l'ARI limite l'exposition respiratoire (28).

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer le niveau de contamination interne au benzène et aux HAP d'une population de formateurs, au travers d'analyses vidéo des pratiques professionnelles visant à mieux analyser les déterminants significatifs de l'exposition, de métrologies d'ambiances, de prélèvements surfaciques cutanés et d'indicateurs biologiques urinaires d'exposition. L'objectif secondaire est d'identifier les déterminants de l'exposition et d'émettre si nécessaire des recommandations de mesures de prévention et protection.

# MATÉRIEL ET MÉTHODES

Il s'agit d'une étude observationnelle réalisée dans le cadre d'une thèse de médecine du travail.

## Population étudiée

Plusieurs types de postes ont été analysés :

- OTR (Outils Taille Réelle) : formateur en tenue de feu complète avec un ARI qui accompagne les stagiaires dans le Simulateur Multi Volume (SMV) ;
- Pilote : formateur en tenue de feu complète avec un ARI qui allume et réalimente les foyers à l'aide de palettes de bois non traité qu'il découpe préalablement avant ou pendant l'exercice ;
- DIREX et RESPEX : formateurs portant uniquement la veste, le pantalon de feu et un masque FFP3 ; il est responsable du bon déroulement de l'exercice, il ne rentre pas dans le SMV ;
- Logisticienne : dépose les EPI (tenue de feu, gants, casque, bouteille d'air) sur le PLT2 et rapporte en fin de journée les caisses contenant les EPI sales. Elle manipule les tenues avec des gants avant de les envoyer au lavage chez un prestataire extérieur.

Les OTR, DIREX, RESPEX et pilote sont équipés d'une tenue de feu complète qui comprend des sous-vêtements techniques haut et bas, un surpantalon de feu, une veste de feu, une cagoule, des gants et un casque de feu (voir photographie en annexe 3). Seule la logisticienne a son uniforme de travail et des gants de manutention.

Chaque journée de formation comprend deux exercices : un le matin et l'autre l'après-midi pour une durée moyenne de trois heures chacun. Deux types de caissons sont utilisés en fonction des objectifs de l'exercice, le SMV pour des phases de reconnaissance, de progression, de récupération de victime et d'extinction ; et

le COEPT pour de l'observation thermique en statique. La charge en bois est en moyenne de 20 kg par foyer mobile et 50 kg par foyer fixe.

## **Les vidéos des pratiques professionnelles**

Durant chaque brûlage, les formateurs ont été filmés sur l'ensemble de la journée d'exercice, les vidéos ont été analysées a posteriori via le logiciel Captiv®.

Le logiciel Captiv® permet d'analyser les situations de travail et aide à l'identification de risques. Cette identification est faite en codant des variables choisies par l'observateur. Elles sont ensuite analysées par Captiv® et elles permettent de calculer la fréquence de pratiques professionnelles.

Les vidéos ont été étudiées en particulier en analysant les variables suivantes : port de gants (avec ou sans), le port d'EPR (aucun, ARI, FFP2 ou FFP3), la position et l'activité des SP (débriefing, repos, dans les fumées ou décontamination) et enfin l'action réalisée pendant la décontamination (lavage du visage, des mains ou des EPI).

## **Les prélèvements atmosphériques**

Des métrologies d'ambiance ont été réalisées lors de plusieurs exercices (génération moyenne à forte de fumées chaudes) pour mesure des concentrations de particules fines ( $PM_1$  et  $PM_{2,5}$  et  $PM_{10}$ ), les HAP particulaires (HAP de hauts poids moléculaires) et gazeux (HAP de bas poids moléculaires). Ces prélèvements ont été réalisés par le SDIS 38 par un détecteur de compteur de particules (particules fines  $PM_{2,5}$  et  $PM_{10}$ ) et par le laboratoire de toxicologie professionnelle du CHUGA (particules fines  $PM_1$  et  $PM_{2,5}$  et HAP). La durée des prélèvements était de 1h-1h15 pour les  $PM_{2,5}$  et  $PM_{10}$ , de 4h (matin et après-midi) pour les HAP et de 8h (analyses en continu) pour les  $PM_1$  et  $PM_{2,5}$ .

Nous avons utilisé du matériel placé en quatre différentes zones :

- Zone du conteneur contenant une voiture en flamme
- Zone du brancard où sont situés les EPI type gants et masques
- Zone de décontamination
- Zone de débriefing

Les particules fines ont été prélevées avec un capteur AirBeam 2 en temps réel. Les prélèvements ont ensuite été analysés en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en se rapportant aux seuils de qualité de l'air de l'OMS en 2021. Les seuils des  $\text{PM}_{2,5}$  et  $\text{PM}_{10}$  sont respectivement de 15 et  $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$  sur 24 heures (29).

Les HAP particulaires et gazeux ont été prélevés avec des pompes en continu. Les HAP ambiants ont été analysés à l'aide d'une solution d'acétonitrile et de dichlorométhane en Chromatographie en Phase Liquide à Haute Performance (HPLC). Les résultats sont exprimés en  $\text{ng}/\text{m}^3$  en fonction du débit de la pompe.

## **Les prélèvements surfaciques cutanés**

Des prélèvements surfaciques cutanés (lingettes) ont été réalisés sur deux zones distinctes : visage-cou et mains. Ils étaient tous réalisés par le même préleveur avec le même geste au moyen d'une lingette de coton tissé de dimension 7,5x7,5cm, préalablement imbibée d'acétone. Les lingettes ont été analysées selon le protocole « MétroPol HAP M-448 » de l'INRS (30). Après prélèvement les lingettes étaient placées dans un tube à essai avec un mélange de dichlorométhane et de méthanol 50/50 pour l'extraction des HAP particulaires. Les échantillons étaient ensuite analysés par désorption par une chromatographie en phase liquide.

Les prélèvements surfaciques cutanés ont été analysés en rapportant le dosage par la surface de lingette soit  $56,25 \text{ cm}^2$ . Selon le pourcentage de surface corporelle de la règle de Wallace (en annexe 2), pour un adulte la surface des deux mains réunies, face ventrale et dorsale est de 4% de la Surface Corporelle Totale (SCT).

Quant à la surface du visage et du cou réunis, face ventrale uniquement, elle est égale à 4,5% de la SCT.

## **Les prélèvements urinaires**

Une campagne de prélèvements urinaires a été réalisée d'avril à juin 2023 sur 22 agents volontaires du SDIS 38. Un questionnaire de renseignement sur la consommation tabagique et en produits d'aliments grillés était rempli au préalable. L'urine était prélevée en début de poste (avant toute exposition), fin de poste et 16h plus tard. Chaque prélèvement d'urine a été recueilli dans un flacon en polypropylène puis stocké et réfrigéré à 5°C avant acheminement rapide au laboratoire pour y être analysé au laboratoire du CHU de Grenoble et corrigé à la créatinine urinaire. En annexe 1 le tableau récapitulatif des prélèvements et leurs Valeurs Biologiques d'Interprétation (VBI) ou Valeurs Biologiques de Référence (VBR) choisies.

## **Les analyses statistiques**

Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel SPSS® (Statistical Package for Social Science). Du fait d'une distribution log-normale, les moyennes géométriques ont été utilisées comme indicateurs de tendance centrale et l'écart-type géométrique comme indice de dispersion. Les comparaisons de moyennes ont utilisé des tests non paramétriques (tests de Mann-Whitney si séries indépendantes, tests de Wilcoxon si séries appariées). Lorsque plusieurs échantillons ont été comparés simultanément, le test de Kruskal-Wallis a été utilisé.

# RÉSULTATS

## Caractéristiques de la population

Les caractéristiques de la population sont indiquées dans le tableau 1, les sujets étaient principalement des hommes non-fumeurs, d'âge médian de 37,5 ans. Parmi les 3 sujets fumeurs, la consommation de cigarette était faible, autour de 4-6 cigarettes par jour.

*Table 1 : Population characteristics*

Main characteristics	Number (n=22)	Percentage n(%)
<b>Sex</b>		
Female	2	(9,1)
Male	20	(90,9)
<b>Age (median) (years)</b>		
	37,5	
<b>Age group (years)</b>		
<35	5	(22,72)
35-40	9	(40,90)
> 40	8	(36,36)
<b>Seniority as instructor (years)</b>		
≤5	12	(54,54)
>5	10	(45,45)
<b>Type of position / smoking status (S/NS)</b>		
OTR	13/ (2S,11NS)	(59,09)
DIREX	2	(9,09)
RESPEX	2 / (1S, 1 NS)	(9,09)
Pilot	4	(18,18)
Logistician	1	(4,54)
<b>Smoking status</b>		
smoker	3	(13,63)
Non smoker	19	(86,36)

S : smoker NS : non smoker

## Analyse vidéo des pratiques professionnelles

Les 21 formateurs ayant participé aux prélèvements biologiques n'ont pas pu être tous filmés. L'analyse vidéo des postes a pu mettre en évidence les différentes pratiques au sein de chaque sous population de formateur (OTR, Pilote et RESPEX) permettant d'identifier un potentiel facteur comportemental dans l'exposition. Les résultats obtenus représentent les comportements observés sur les formateurs filmés durant les 4 journées de prélèvements. Les résultats sont présentés dans la figure 2 (le poste de « formateurs » correspond aux OTR). Les postes de logisticienne et DIREX n'ont pas pu être filmés, ils ne seront pas analysés.

### Poste OTR

Pendant l'exercice, le port de sous gants est très variable d'un OTR à un autre. Environ 17% des OTR ne portent pas de protection cutanée en dessous des gants de feu, 30% ne porte aucun équipement de protection respiratoire (EPR) en dehors du caisson. Sachant que les OTR sont en moyenne 60% du temps de l'exercice en dehors du caisson à proximité des fumées (dans les zones de repos, débriefing ou brancard). On peut noter que la plupart des OTR portent des sous gants et un masque FFP3 pendant la phase de décontamination.

### Poste Pilote

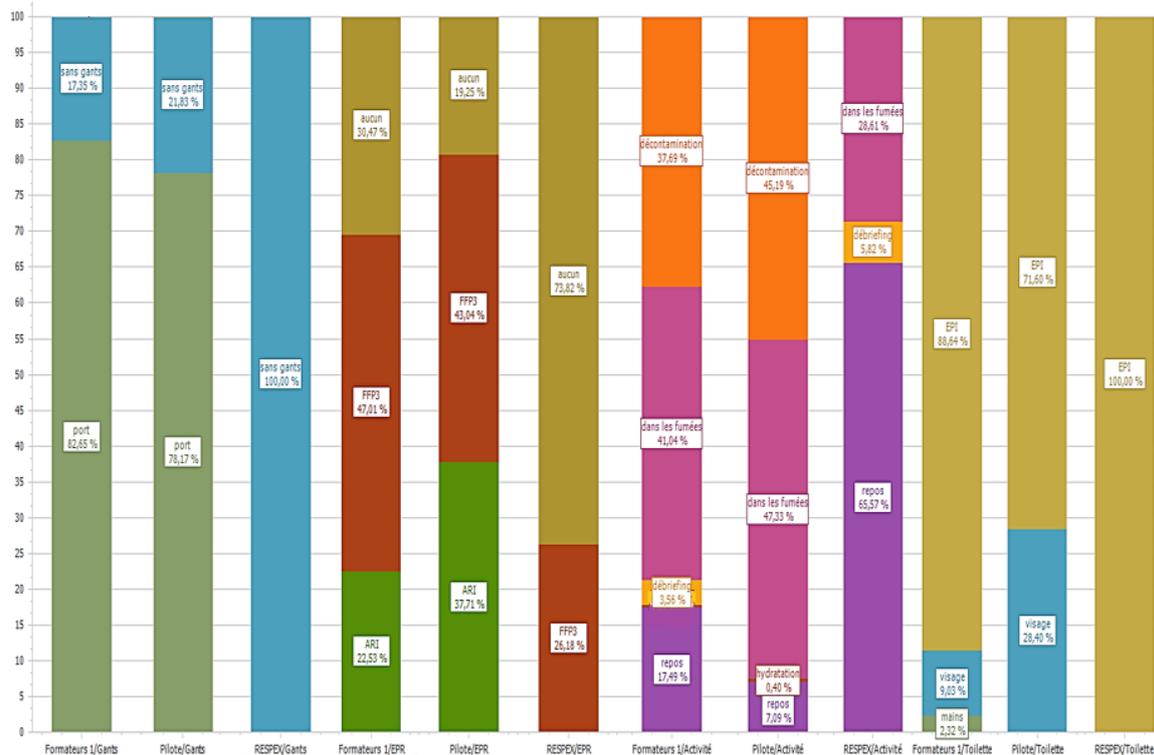
Le pilote est l'un des postes les plus exposés puisqu'il se charge de l'allumage du foyer et de l'entretien de celui-ci. Il déblaie les cendres de la veille avec une pelle, protégé par un masque FFP3 et des gants de manutention. Cette phase est à forte aérosolisation des particules (31). Pour maintenir le foyer, il fait une vingtaine d'allers-retours dans le caisson par demi-journée d'exercice. Le pilote a peu de temps pour se reposer entre les sessions. Il porte son ARI et sa tenue de feu complète la majeure partie du temps. A l'extérieur du caisson, 43% des pilotes portent un masque FFP3 et 25% des pilotes ne portent pas de sous gants durant

l'exercice. Le pilote comme les OTR participent à la décontamination avec des gants et un masque FFP3.

### Poste RESPEX

Le RESPEX reste à l'extérieur du caisson durant toute la durée de l'exercice, c'est pourquoi il est exposé aux fumées en fonction de la direction du vent et de la zone où il se situe (zone de repos, débriefing et brancard). A l'extérieur du caisson, environ  $\frac{1}{4}$  des RESPEX (26%) porte un masque FFP3. Les deux RESPEX filmés ont déclaré porter des gants, or aucun ne portaient de gants pendant les vidéos. A l'extérieur, il participe au bon déroulement de l'exercice, au débriefing, aux changements des bouteilles d'air vides de ses collègues et aide au portage manuel de palette. Le RESPEX touche du matériel souillé (les EPI sales et les bouteilles d'air). Ces observations peuvent expliquer les concentrations d'HAP cutanées retrouvées sur les mains des RESPEX.

Figure 2 : Profesional practices by type of shift (%) on all videos



Formateurs 1= OTR

## Prélèvements d'ambiance atmosphériques

Les concentrations atmosphériques ambiantes en  $PM_{10}$  et  $PM_{2.5}$  ont été mesurées lors de divers exercices (trois foyers mobiles d'une charge initiale de 20kg de palette de bois non traité, un foyer fixe de véhicule en feu, des foyers mobiles sur plusieurs étages). Les concentrations particulières sont présentées dans le tableau 2.

Les concentrations en particules fines mesurées par le SDIS 38 sont respectivement comprises entre 2 et  $486 \mu g/m^3$  ( $PM_{2.5}$ ) ainsi qu'entre 15 et  $930 \mu g/m^3$  ( $PM_{10}$ ). Les zones les plus polluées sont celles situées à proximité immédiate du caisson où se reposent les OTR et pilotes sans protection respiratoire, avec des concentrations médianes de  $59 \mu g/m^3$  pour les  $PM_{2.5}$  et de  $97 \mu g/m^3$  pour les  $PM_{10}$ . Les zones de brancard, de débriefing et de décontamination sont les moins polluées, avec des concentrations respectivement 5 fois plus faibles en  $PM_{2.5}$  (Med :  $12 \mu g/m^3$ ) et 3 fois plus faibles en  $PM_{10}$  (Med :  $32 \mu g/m^3$ ).

On observe que les seuils de référence 24h OMS (2021), respectivement de 15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  pour les  $\text{PM}_{2.5}$  et 45  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  pour les  $\text{PM}_{10}$ , sont souvent dépassés, aussi bien à proximité immédiate des caissons que ponctuellement à distance (5-10m) (29). La proportion des  $\text{PM}_{2.5}$  par rapport aux  $\text{PM}_{10}$  est très variable, allant de 14 à 52% (Med : 30%). Cette proportion de  $\text{PM}_{2.5}$  est plus importante (49%) à proximité des caissons qu'à distance (34%). Les concentrations les plus élevées sont mesurées lors de l'ouverture de porte du SMV, pic de  $\text{PM}_{2.5}$  à 466  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  et pic de  $\text{PM}_{10}$  à 929  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Le bac où sont stockés les EPI sales présentait une forte concentration de  $\text{PM}_{10}$  à 217  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  et une faible concentration de  $\text{PM}_{2.5}$  à 16  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Les mesures de  $\text{PM}_1$  et  $\text{PM}_{2.5}$  réalisées par des capteurs portatifs sont présentés en annexe 9 à 13 avec les pics particules en fonction du lieu de prélèvement. Les concentrations de  $\text{PM}_1$  sont comprises entre 1 et 335  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . La proportion de  $\text{PM}_1$  par rapport aux  $\text{PM}_{2.5}$  est en moyenne de 67%, indiquant un aérosol contenant probablement des nanoparticules ( $d_{ae} < 0.1 \mu\text{m}$ ) en son sein. Des pics de concentration atteignant jusqu'à 300  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en  $\text{PM}_1$  et 600  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en  $\text{PM}_{2.5}$  sont mesurés.

*Table 2 : Concentration of fine particulate  $\text{PM}_1$  and  $\text{PM}_{2.5}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )*

Moment de prélèvement	$\text{PM}_1$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	$\text{PM}_{2.5}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	$\text{PM}_1/\text{PM}_{2.5}$ (%)	(min-max)
<b>Matin</b>				
7h45-8h30 (bruit de fond)	5-11	8-17	67	
8h31-9h20 (allumage foyers)	3-78	6-77	66	
9h21-9h49 (début exercice et zone repos pilote à proximité immédiate du SMV)	3-300	6-416	69	
9h50-10h14 (zone débriefing)	3-195	6-219	70	
10h15-10h49 (zone repos OTR à proximité du SMV)	3-225	6-357	73	
10h50-10h55 (intérieur masque ARI et zone	3-34	6-49	66	

débriefing proche conteneur palette)				<b>(min-max)</b>
10h56-11h42 (local tactique/ salle à manger)	3-80	6-88	65	
<b>Après-midi</b>				
13h20-13h29 (au sein du conteneur avant allumage foyer)	2-292	3-451	56	
13h30-13h49 (allumage foyer et début exercice)	1-101	3-84	71	
13h50-14h04 (en haut des escaliers)	1-335	3-602	83	
14h05-14h19 (en bas des escaliers)	1-234	3-602	66	
14h20-14h25 (zone brancard AM)	2-9	3-13	55	
14h26-14h49 (repos pilote proche SMV)	3-280	5-450	86	
14h50-15h29 (zone débriefing AM)	1-73	3-82	61	
15h48-15h49 (zone de décontamination)	2-40	4-57	59	

Table 3 : Concentration of fine particulate  $PM_{2,5}$  and  $PM_{10}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

<b>Moment de prélèvement</b>	<b><math>PM_{2,5}</math> (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b><math>PM_{10}</math> (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b><math>PM_{2,5}/PM_{10}</math> (%)</b>	<b>(min-max)</b>
Entrée du site PLT2	2	17	12	
Zone brancard matin	4-12	21-56	23	
Entrée conteneur voiture	4-68	22-102	35	
Zone de brancard AM	98	153	64	
Zone débriefing AM	8-122	23-142	86	
Zone sous les escaliers	4-64	23-142	27	
Zone COEPT décalé	3	15	20	
Zone palette	5-12	22-47	28	
Zone repos OTR	75-95	93-136	80	
Porte entrée foyer	65-485	97-930	67	

Les concentrations atmosphériques ambiantes en HAP ont été réalisées en différentes zones : la zone de débriefing post exercice, la zone brancard (où sont stockés gants, masques et lingettes nettoyantes), la zone de repos, une zone à proximité immédiate du conteneur contenant une carcasse de voiture en flamme, et enfin la dernière zone la plus éloignée du SMV : la zone de décontamination. Le profil des HAP gazeux et particulaires sont présenté en annexe 7 et 8.

Les concentrations en HAP gazeux et particulaires étaient respectivement comprises entre 2 200 à 54 000 ng/m<sup>3</sup> et 236 à 12 808 ng/m<sup>3</sup>. Les pourcentages des HAP particulaires et gazeux sont présentés en annexe figure 2 et 3. Les concentrations diffèrent selon la zone de prélèvement. Les concentrations les plus importantes sont retrouvées logiquement dans la zone contenant la voiture en flamme. Cependant on observe des niveaux importants au niveau de la zone de repos où les formateurs et stagiaires retirent l'ARI et s'hydratent en sortie du SMV.

Les HAP gazeux prédominants sont en majorité du naphthalène puis du phénanthrène et du fluorène. Les HAP particulaires prédominants sont pour la moitié du fluoranthrène, du pyrène, et pour un peu moins de 10% du BaP.

Les concentrations en BaP, métabolite cancérogène sont comprises entre 19 et 924 ng/m<sup>3</sup>. L'exposition respiratoire au BaP est inversement proportionnelle à la distance avec le SMV.

Figure 2 : Concentrations of gaseous PAH

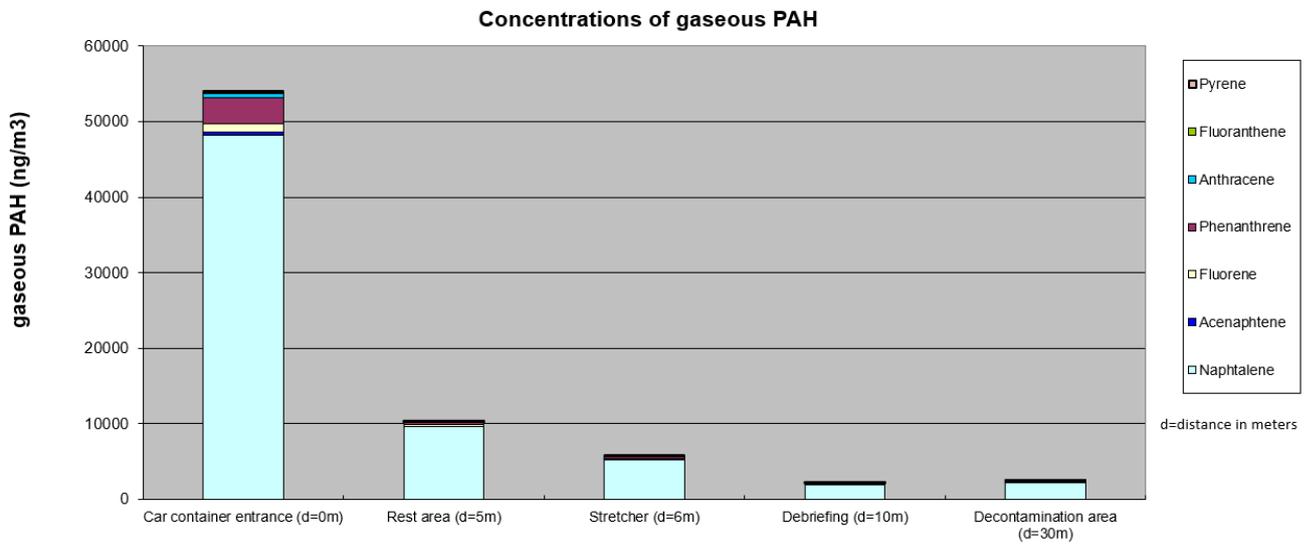
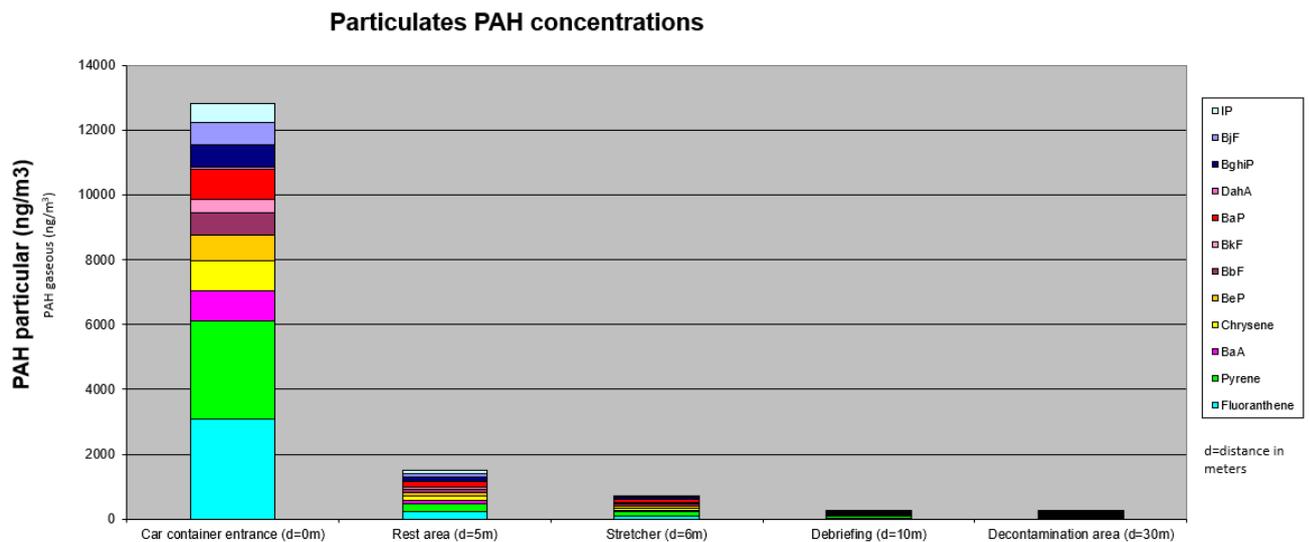


Figure 3 : Particulates PAH concentrations



## Prélèvements surfaciques cutanés

Les résultats sont exprimés en ng/lingette (tableaux 4 et 5) et ng/cm<sup>2</sup> en annexe tableau 6. Sur les 22 sujets, seulement 21 ont été testés. La majorité des sujets portaient des sous-gants en latex, vinyle ou nitrile et seulement 6 ont déclaré ne porter aucun gant sous les gants de feu. Les quantités moyennes d'HAP retrouvées

sur la zone visage/cou et mains sont similaires, elles représentent entre 0,74 et 1056 ng/lingette soit de 0,013 à 19 ng/cm<sup>2</sup>. Les quantités d'HAP retrouvées sur la zone des mains sont comprises entre 0,40 et 1 460 ng/lingette soit de 0,01 à 26 ng/cm<sup>2</sup>. Les exercices du matin et de l'après-midi étaient les mêmes, ce qui est concordant avec des concentrations ambiantes comparables en HAP mesurées du matin et de l'après-midi. Lors du port de sous gants en nitrile, on observe des niveaux moyens d'HAP sur les mains 3 fois plus faibles que quand d'autres types de sous-gants sont portés. A l'inverse, les porteurs de gants vinyle ont des quantités d'HAP sur les mains 8,1 fois plus importantes que les porteurs de gants en nitrile. Le port de gant nitrile est associé à des quantités significativement plus faibles d'HAP totaux, de pyrène et de BaP ( $p < 0,05$ ). Concernant les mesures d'hygiène, 40,9% des sujets déclarent prendre une douche et 45,5% des sujets ont changé de sous-vêtements le midi entre les deux exercices. Il n'y avait pas de différence significative de quantités d'HAP cutanés retrouvés sur le visage-cou et les mains pour les sujets prenant une douche ou ayant changé de sous-vêtements à midi. Comme retrouvé précédemment, nous pouvons constater que les postes de pilotes et OTR montrent des niveaux cutanés en pyrène et BaP plus élevés que les autres agents. A noter que le poste de RESPEX montre une forte exposition cutanée, surtout au niveau des mains, ce qui est cohérent avec l'absence des RESPEX à l'intérieur du SMV (pas de contamination visage et cou).

Table 4: Average of total PAH on hands by type of gloves in ng/wipe and ng/cm<sup>2</sup>

Average of Total PAH by type of gloves in <b>ng/wipes</b> and ng/cm <sup>2</sup> (all workers)	Hands	
<b>ng/wipe</b> AND ng/cm <sup>2</sup>		
Gloves (all types)	<b>137</b>	2,4
Nitrile gloves (n=6)	<b>37</b>	0,7
Latex gloves (n=4)	<b>90</b>	0,7
Vinyle gloves (n=5)	<b>300</b>	5,3
No gloves (n=6)	<b>96</b>	1,7

Average of pyrene and BaP on surface skin samples ng/wipe	Average of PYR per wipe	Average of BaP per wipe	Average sum of PAHs
All wipes	287,45	81,62	107,18
Face and neck	266,09	50,50	86,9
Hands	308,82	57,74	127,46
RESPEX (n=2)	251,73	58,10	101,12
DIREX (n=1)	56,50	8,71	18,52
LOGISTICIAN (n=1)	85,07	13,42	25,58
OTR (n=10)	296,18	79,11	112,45
PILOT (n=4)	391,31	95,33	138,59
All gloves	295	79	136,86
Latex gloves (n=4)	212	54	89,56
Nitrile gloves (n=6)	210	43	37,05
Vinyle gloves (n=5)	463	142	299,72

*Table 5: Average of pyrene and BaP on surface skin samples (ng/wipe)*

Figure 4: Skin contamination Face and Neck by PAH (ng/wipe)

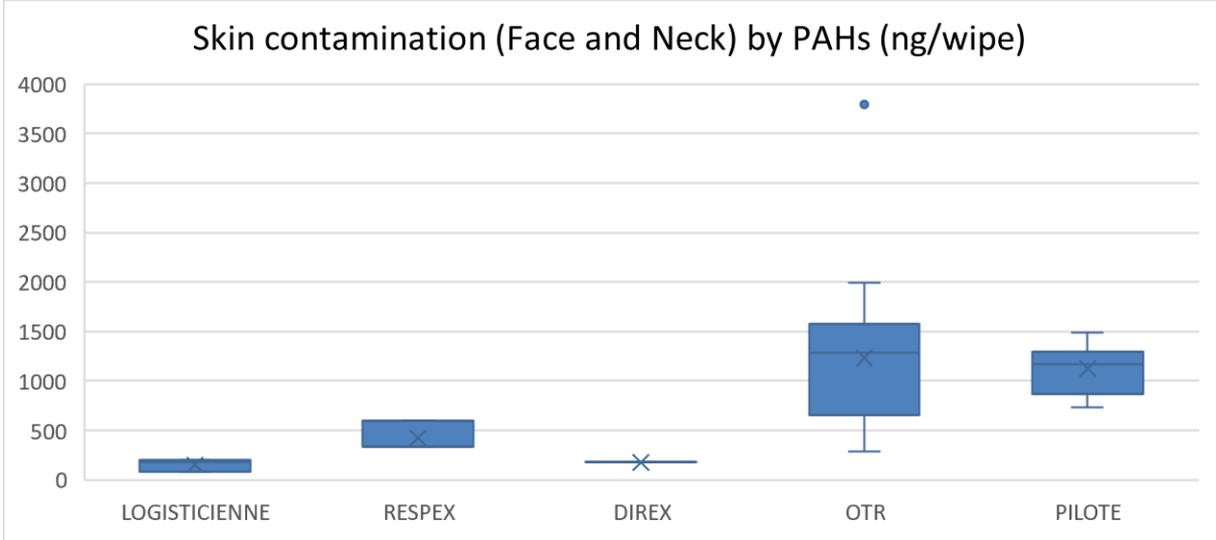
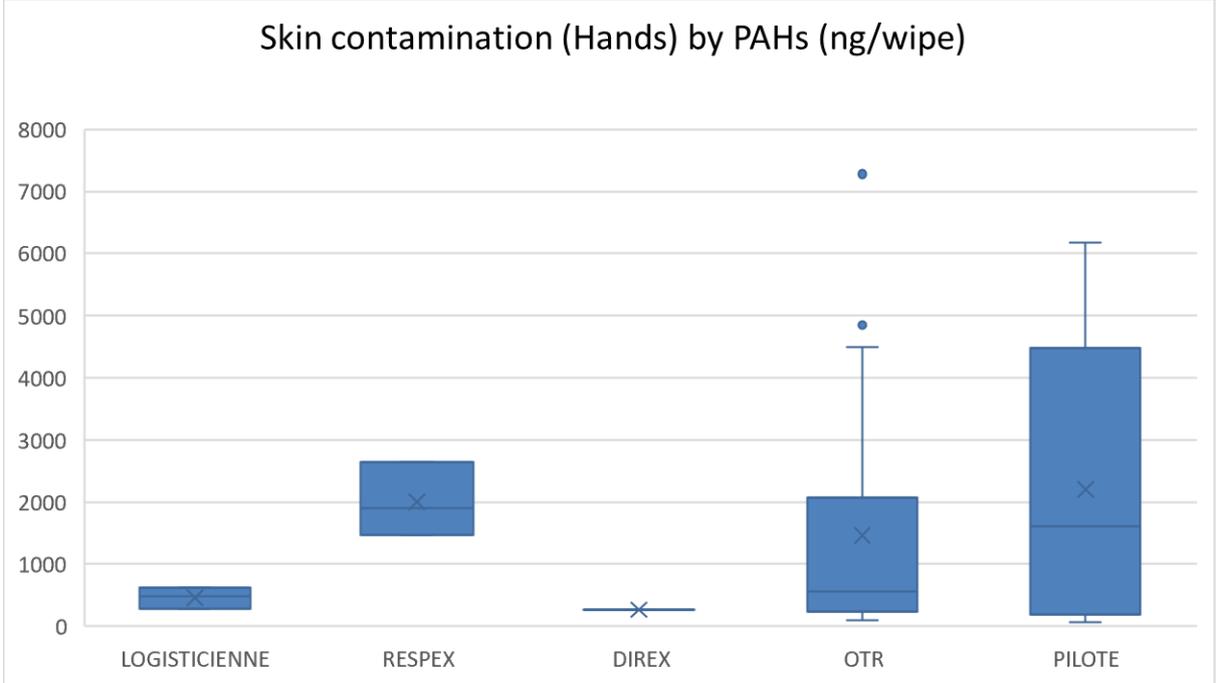


Figure 5: Skin contamination Hands by PAH (ng/wipe)



## Prélèvements urinaires

### Concentrations du métabolite du Benzène (S-PMA)

Les concentrations en S-PMA sont comprises entre 0,05 et 0,93 µg/g de créatinine. Les concentrations les plus élevées sont retrouvées chez les sujets fumeurs. Aucun sujet ne dépasse les concentrations maximales recommandées en milieu professionnel, cependant 4 sujets dont un non-fumeur dépassent les concentrations maximales (P<sub>95</sub>) observées en population générale (3 OTR et 1 RESPEX). Les concentrations de S-PMA chez les OTR et pilotes étaient significativement plus élevées en FP et FP+16h qu'en DP (P<0,05). Les concentrations de S-PMA étaient significativement augmentées chez les fumeurs en FP et FP+16h. Les OTR semblent plus exposés que les autres SP. Les résultats des RESPEX sont moins interprétables en raison du statut tabagique (fumeurs) des deux agents.

Nos résultats montrent une exposition faible à modérée au benzène lors de la combustion de palette de bois non traité, et une forte influence du statut tabagique des sujets.

Figure 6: Concentrations of S-PMA by exposure group of shift

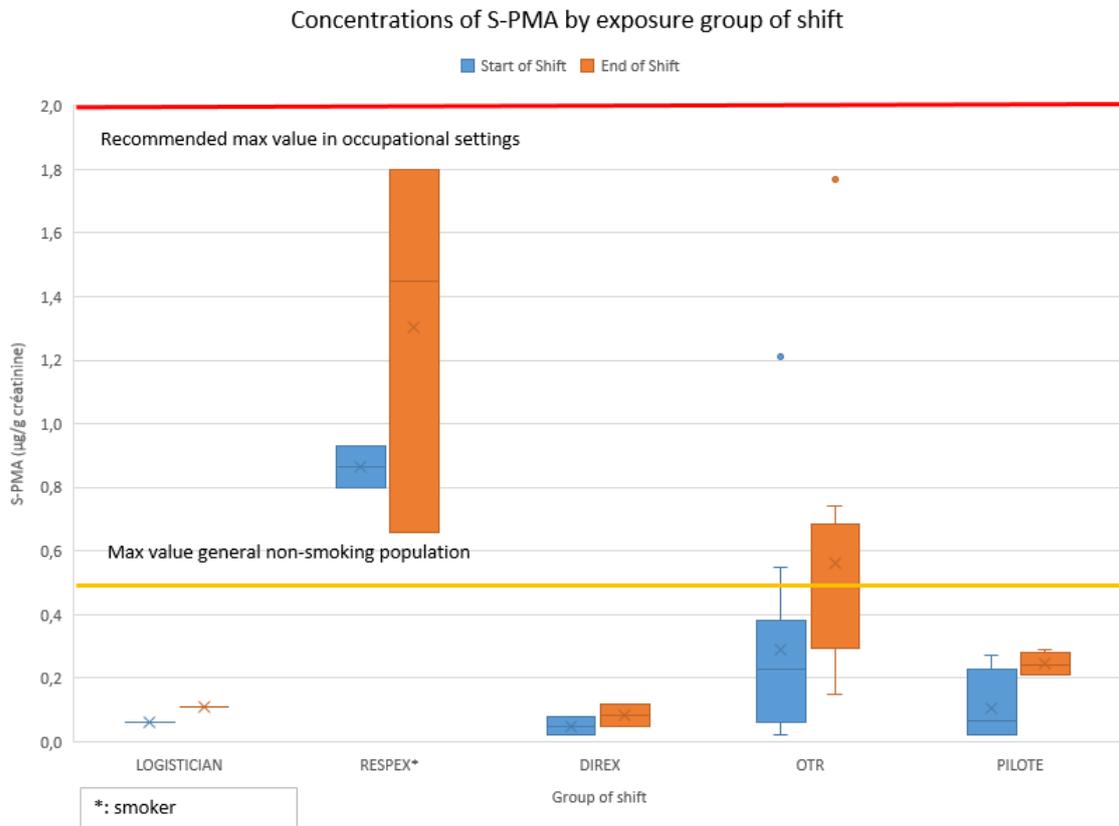


Table 6: concentration of SPMA at SS, ES and ES+16h

Poste de travail		SPMA urinaire µg/g de créatinine_DP	SPMA urinaire µg/g de créatinine_FP	SPMA urinaire µg/g de créatinine_FP16
DIREX	Moyenne Géométrique	<b>0,039</b>	<b>0,078</b>	<b>0,031</b>
	Minimum	0,020	0,052	0,026
	Maximum	0,078	0,117	0,036
	N	2	2	2
LOGISTICIENNE	Moyenne Géométrique	<b>0,046</b>	<b>0,108</b>	<b>0,112</b>
	Minimum	0,038	0,108	0,112
	Maximum	0,057	0,108	0,112
	N	2	1	1
OTR	Moyenne Géométrique	<b>0,215</b>	<b>0,464</b>	<b>0,280</b>
	Minimum	0,050	0,147	0,041
	Maximum	1,207	1,771	1,447
	N	13	13	13
PILOTE	Moyenne Géométrique	<b>0,182</b>	<b>0,239</b>	<b>0,154</b>
	Minimum	0,107	0,206	0,126
	Maximum	0,270	0,286	0,177
	N	4	4	4
RESPEX	Moyenne Géométrique	<b>0,859</b>	<b>1,196</b>	<b>1,093</b>
	Minimum	0,796	0,658	0,893
	Maximum	0,929	1,802	1,234
	N	2	3	3

### Concentrations du métabolite du Pyrène (1-OHP)

Les concentrations en 1-OHP sont comprises entre 0,02 et 2,77 µmol/mol de créatinine. Sur les 22 sujets, 9 dépassent la concentration maximale recommandée en milieu professionnel (7 OTR et 2 pilotes) et 10 dépassent les concentrations maximales (P<sub>95</sub>) observées en population générale (6 OTR, 2 pilotes et 2 RESPEX). Les concentrations du 1-OHP sont significativement plus élevées en FP qu'en DP (P<0,05). Les concentrations d'1-OHP ne sont pas significativement différentes en fonction du statut tabagique. Les concentrations du 1-OHP sont significativement élevées en FP et FP+16h qu'en DP ; alors que les concentrations en FP et FP+16h sont similaires. Cette observation est le témoin d'une absorption cutanée et non uniquement respiratoire du 1-OHP. Les concentrations en FP sont 23 fois et 14 fois plus élevées qu'en DP chez les OTR et pilotes respectivement.

Dans l'ordre décroissant des postes les plus exposés, on retrouve les OTR et les pilotes dont les expositions sont très supérieures à celles des RESPEX, des DIREX et de la logisticienne dont les expositions sont faibles. Nos résultats montrent une exposition modérée à forte au pyrène le jour des recueils d'urines.

Figure 7: Concentrations of 1-OHP by exposure group of shift

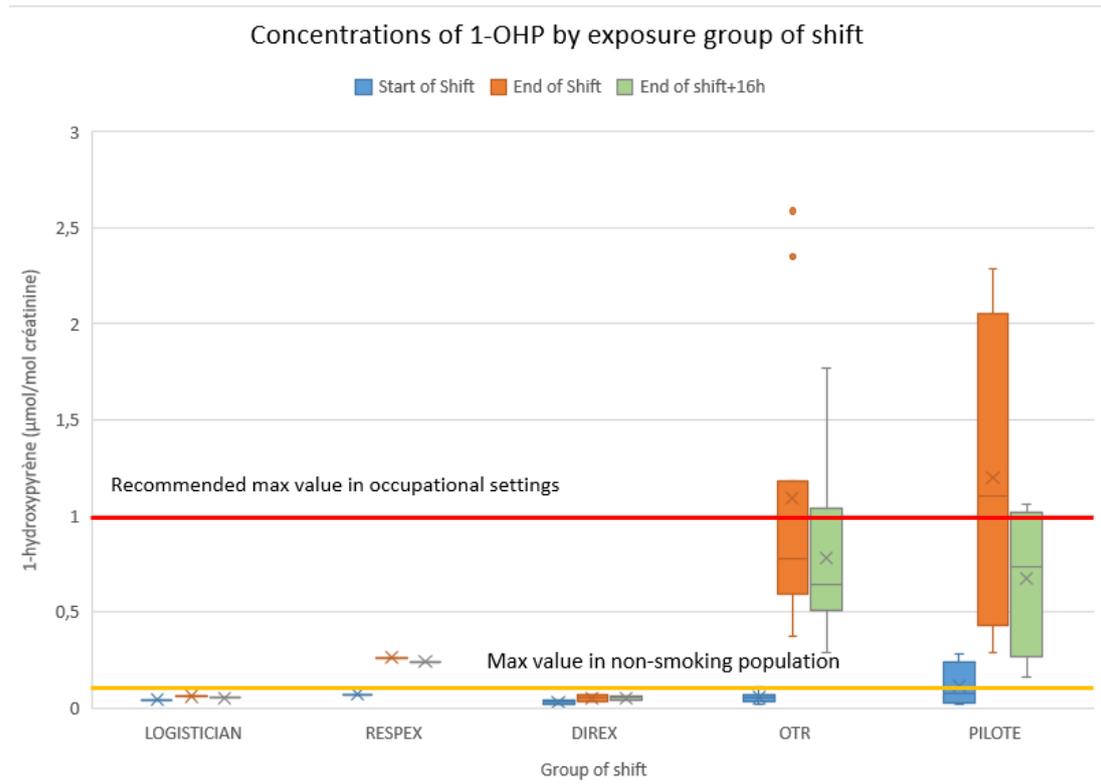


Table 7: concentration of 1-OHP at SS, ES and ES+16h

Poste de travail		1-OHP urinaire μmol/mol de créatinine_DP	1-OHP urinaire μmol/mol de créatinine_FP	1-OHP urinaire μmol/mol de créatinine_FP16
DIREX	Moyenne Géométrique	<b>0,013</b>	<b>0,048</b>	<b>0,047</b>
	Minimum	0,005	0,033	0,035
	Maximum	0,038	0,071	0,064
	N	2	2	2
LOGISTICIENNE	Moyenne Géométrique	<b>0,039</b>	<b>0,056</b>	<b>0,054</b>
	Minimum	0,035		
	Maximum	0,043		
	N	2	1	1
OTR	Moyenne Géométrique	<b>0,043</b>	<b>1,011</b>	<b>0,724</b>
	Minimum	0,020	0,365	0,288
	Maximum	0,113	2,767	2,125
	N	13	13	13
PILOTE	Moyenne Géométrique	<b>0,063</b>	<b>0,933</b>	<b>0,541</b>
	Minimum	0,023	0,286	0,157
	Maximum	0,279	2,291	1,055
	N	4	4	4
RESPEX	Moyenne Géométrique	<b>0,073</b>	<b>0,339</b>	<b>0,349</b>
	Minimum	0,072	0,262	0,236
	Maximum	0,074	0,460	0,455
	N	2	3	3

### Concentrations du métabolite du Benzo(a)pyrène (3-OHBaP)

Les concentrations en 3-OHP sont comprises entre 0,01 et 0,98 nmol/mol de créatinine. Sur les 22 sujets, 5 dépassent la concentration maximale recommandée en milieu professionnel de 0,4 nmol/mol de créatinine (4 OTR et 1 pilote) et 4 dépassent les concentrations maximales (P<sub>95</sub>) observées en population générale (2 OTR et 2 pilotes). On observe en moyenne des concentrations en DP plus faibles qu'en FP+16h. Les concentrations en FP+16h sont significativement plus élevées chez les pilotes et OTR que chez les autres sapeurs-pompier. Il n'y avait pas de différence significative des concentrations urinaires du BaP chez les fumeurs, comparé aux non-fumeurs. Cela conforte que l'exposition au BaP est liée à la fumée de combustion et non à la consommation de tabac. Nos résultats montrent une exposition forte au BaP (biomarqueur de l'exposition cancérigène aux HAP) chez les pilotes et OTR les jours de recueil des urines.

Figure 8: Concentrations of 3-OHBaP by exposure group of shift

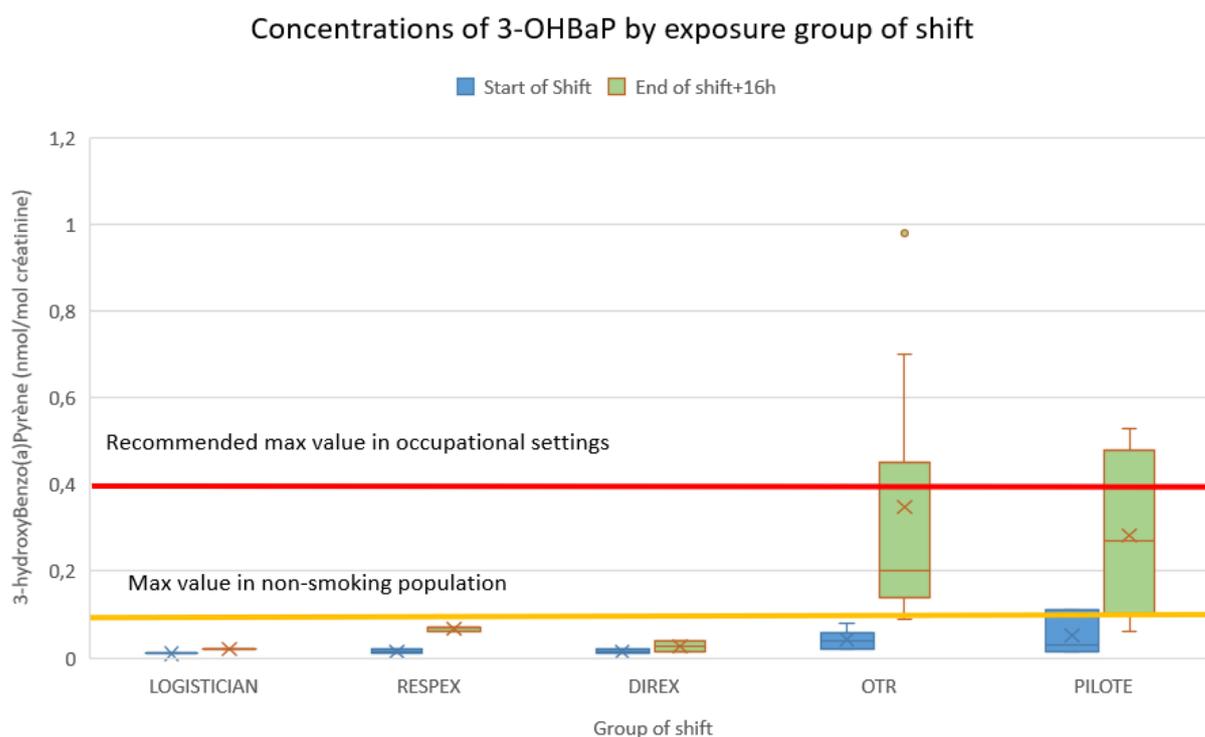


Table 8: concentration of 3-OHBaP at SS, ES and ES+16h

3OHBaP urinaire nmol/mol de créatinine\_FP16

Poste de travail	Moyenne Géométrique	Minimum	Maximum	N
DIREX	<b>0,013</b>	<b>0,005</b>	<b>0,037</b>	2
LOGISTICIENNE	0,021			1
OTR	0,262	0,086	0,984	11
PILOTE	0,213	0,055	0,530	4
RESPEX	0,064	0,060	0,067	3

### Concentrations des métabolites du Fluorène (2 et 3-OHFluo)

Pour les métabolites du fluorène il n'existe pas de concentrations maximales recommandées en milieu professionnel. Les concentrations en 2-OHFluo sont comprises entre 0,07 et 7,03  $\mu\text{mol/mol}$  de créatinine. Les concentrations en 2-OHFluo étaient significativement plus élevées en FP qu'en DP ( $p < 0,05$ ). 18 sujets dépassent les concentrations observées en population générale (13 OTR, 4 pilotes et 1 RESPEX).

Les concentrations en 3-OHFluo sont comprises entre 0,07 et 7,03  $\mu\text{mol/mol}$  de créatinine. 17 sujets dépassent les concentrations observées populationnelles (13 OTR et 4 pilotes). On observe en moyenne des concentrations de fluorène plus faibles en DP qu'en FP. On retrouve le même ordre en terme d'exposition, avec des niveaux plus élevés chez les OTR et pilotes que chez les autres professions.

#### Concentrations des métabolites des Phénanthrènes (2 et 3-OHPhen)

Pour les métabolites des phénanthrènes il n'existe pas de concentrations maximales recommandées en milieu professionnel. Les concentrations en 2-OHPhen sont comprises entre 0,03 et 2,22  $\mu\text{mol/mol}$  de créatinine. 18 sujets dépassent les concentrations observées en population générale (13 OTR, 4 pilotes et 1 RESPEX).

Les concentrations en 3-OHPhen sont comprises entre 0,03 et 3,43  $\mu\text{mol/mol}$  de créatinine. 20 sujets dépassent les concentrations observées en population générale (13 OTR, 4 pilotes et 3 DIREX). On observe en moyenne des concentrations en phénanthrènes plus faibles en DP qu'en FP. Les OTR et pilotes sont les plus exposés au phénanthrène le jour des prélèvements.

*Table 9: Average concentrations of fluorene and phenanthrene metabolites at the end of shift*

<b>Average concentration</b> ( $\mu\text{mol/mol}$ creatinine) <b>Type of shift</b> (number)	<b>2-OHFluo</b>	<b>3-OHFluo</b>	<b>2-OHPhen</b>	<b>3-OHPhen</b>
<b>RESPEX</b> (n=1)	0,78	0,45	0,15	0,29
<b>DIREX</b> (n=2)	0,20	<LQ	0,05	0,07
<b>LOGISTICIAN</b> (n=1)	0,18	<LQ	<LQ	0,05
<b>OTR</b> (n=11)	2,22	0,50	0,65	1,08
<b>PILOTS</b> (n=4)	2,11	0,52	0,54	1,20

Le croisement de l'ensemble de nos résultats nous a permis de constater que les OTR ayant les concentrations d'HAP cutanées et de métabolites urinaires les plus élevées ne portent pas de sous gants ni d'EPR. Chez ces mêmes OTR, les concentrations en HAP cutanées et urinaires sont en moyenne respectivement de 5 et 1,5 fois plus élevées que celles des OTR portant des sous gants et des EPR. De plus y a une bonne corrélation entre les concentrations en HAP cutanées sur le visage et cou et les concentrations urinaires du 2-OHFluo. On peut expliquer les concentrations en HAP urinaires et cutanées des pilotes par leur temps d'exposition aux fumées qui représente environ de 50% du temps total de l'exercice. Les pilotes qui portent des sous gants et un masque FFP3 ont des concentrations d'HAP urinaires deux fois inférieures à ceux n'en portant pas. Au total les formateurs ayant les concentrations d'HAP urinaires et cutanées les plus basses sont ceux portant des sous gants et un masque FFP3 en dehors du caisson et pendant la phase de décontamination.

## DISCUSSION

Notre étude s'est intéressée à l'exposition des formateurs SP aux fumées d'incendies et aux produits de combustion tels que le benzène et les HAP. Dans l'ensemble, cette étude retrouve une exposition faible au benzène mais des expositions modérées à fortes aux HAP, notamment au pyrène et au BaP. L'exposition est très variable en fonction du poste, du type de sous gants et des pratiques individuelles. Les pilotes et OTR sont les plus exposés, ce qui est cohérent avec leur temps de présence plus important à l'intérieur des caissons. Il existe une corrélation entre les quantités d'HAP sur la peau (mains, visage, cou) et les concentrations urinaires des métabolites des HAP, indiquant que la voie cutanée est importante dans l'exposition globale des SP. Ceci est également cohérent avec une protection respiratoire importante (ARI) des agents lors des interventions dans le SMV.

Nos résultats suggèrent néanmoins une exposition mixte aux HAP, à la fois respiratoire et cutanée. L'exposition respiratoire, objectivée par des niveaux élevés d'HAP dans l'air autour des conteneurs, interviendrait lors de l'enlèvement des ARI et/ou de la présence sans EPI dans les fumées. L'exposition cutanée interviendrait quant à elle lors du déshabillage et de la décontamination du matériel.

Les voies d'exposition semblent différentes en fonction du type de poste et des pratiques individuelles :

- La logisticienne est très peu exposée car elle n'est pas présente pendant l'exercice générant de la fumée. Elle peut néanmoins se contaminer lors de la manipulation d'EPI sales sans gants.

- Les DIREX et RESPEX sont en dehors du SMV et s'exposent majoritairement par voie respiratoire avec une part cutanée lors de la manipulation d'EPI sales sans gants.

- Les pilotes et OTR s'exposent majoritairement par voie cutanée qui interviendrait potentiellement de deux façons : exposition directe lors du nettoyage du matériel et déshabillage, mais aussi indirecte si des particules fines (voire ultrafines) sont susceptibles de traverser la tenue et de se déposer sur la peau sous les vêtements. L'exposition respiratoire intervient néanmoins également en sortie du SMV lorsque les formateurs enlèvent leur ARI et se reposent à proximité immédiate de celui-ci.

Dans la littérature on peut retrouver plusieurs concordances avec nos observations, pour rappel nous avons pu constater que l'exposition était principalement cutanée et non respiratoire en lien avec les pratiques professionnelles comme le port d'EPR. Les concentrations urinaires des HAP sont directement liées à la pratique des formateurs en caisson et non à la consommation du tabac. Concernant les métabolites urinaires du benzène, ils étaient en lien avec la consommation de tabac. La zone du cou est bien corrélée aux concentrations urinaires d'HAP et le port de gants nitrile limite le passage transcutané d'HAP particuliers.

Nous avons mesuré une prédominance d'HAP légers (naphtalène, fluorène, phénanthrène et pyrène) dans l'air à proximité des foyers, ce qui est cohérent avec les mesures rapportées par l'INERIS avec une prédominance du naphtalène dans l'air ambiant et la prédominance des particules de petites tailles (<1 µm) émises par les feux de bois (16). Concernant les particules fines, rappelons que le CIRC les a classées dans le groupe 1 (cancérogène avéré) des agents cancérogènes depuis 2013 (32).

L'exposition respiratoire intervient pendant la lutte contre les incendies lors du retrait de l'ARI, elle a été décrite par Ariel et al. 2019, Nicola Cherry et al. 2019 qui montrent que l'utilisation d'EPR est négativement corrélée aux concentrations urinaires du 1-OHP (20,33). Dans la mesure où les formateurs enlèvent l'ARI pour une meilleure respiration en sortie du SMV mais aussi pour diminuer en température et pour une meilleure communication orale, on peut supposer que les formateurs majorent leur exposition respiratoire car ils hyperventilent du fait de l'effort physique intense pendant l'exercice.

L'exposition faible au benzène a été mesurée dans une étude d'Alloneau et al. 2019 (18) qui retrouvait des concentrations détectables chez les fumeurs exposés et indétectables chez les non-fumeurs exposés. Aucun des sujets ne dépassait les VBI allemandes choisies dans cette étude. Comme dans notre étude, les concentrations urinaires du métabolite du benzène étaient significativement augmentées chez les sujets fumeurs. Dans cette même étude, les concentrations du 1-OHpyrène pour le groupe exposé dépassaient presque toutes la médiane NHANES des non-fumeurs et pour le 3-OHBaP il n'a été détecté qu'en fin de semaine, fin de poste suggérant une accumulation. Même constat pour l'étude d'Alloneau et al. en 2021 qui ne retrouvait pas de 3-OHBaP dans les urines, indiquant que le biomarqueur du BaP n'est pas le plus pertinent pour de faibles expositions (34). Nos résultats diffèrent car les concentrations urinaires du 3-OHBaP étaient significativement plus élevées en FP+16h qu'en DP. Les concentrations du 1-OHP similaires retrouvées en FP et FP+16h suggèrent une exposition cutanée. Rappelons que la première demi-vie du pyrène est de 5h et celle du BaP de 9h (35). Si l'exposition était uniquement respiratoire les sujets auraient dû éliminer la moitié des métabolites du pyrène en FP+16h, or ce n'est pas le cas. Nos résultats évoquent donc des expositions plus fortes que dans les études citées précédemment et à prédominance cutanée.

Les expositions par voies cutanées ont été étudiées par d'autres auteurs, on peut citer Kenneth et al. 2014, Katherine M. Kirk et al. 2015 et 2019 concernant l'hypothèse de passage d'HAP particulaires à travers la tenue en particulier sur la zone du cou, la cagoule de feu offrant une protection inférieure à la tenue de feu (35–37). Cette observation est à nuancer avec la finesse de la peau du cou qui serait plus sensible comparée à d'autres zones corporelles, citée dans le rapport de l'ANSES 2019 et Wilbert van den Eijnde 2019 (19,38). Comme le montre nos résultats les concentrations urinaires étaient corrélées avec les concentrations retrouvées sur la zone du visage et du cou, validant cette hypothèse de prédominance de la voie cutanée.

Rappelons que l'ambiance particulaire mesurée au SMV était majoritairement composée de particules fines ( $PM_{10}$ ) voire de particules ultrafines ( $PM_{2,5}$  et  $PM_1$ ). Les particules de plus petites tailles pourraient traverser la tenue de feu et se déposer directement sur la peau des formateurs comme le suggèrent nos résultats montrant une forte exposition cutanée aux HAP.

Notre travail a également permis de mettre en évidence la meilleure efficacité des gants en nitrile pour protéger de l'absorption cutanée des HAP, et l'inefficacité des gants en vinyle. La manipulation d'EPI sales contribue à l'exposition cutanée des SP comme le suggère Andrew P.W. Banks et al. 2020 (25). Dans la revue *Toxics*, Stijn et al. 2023 ont montrés que certains types de gants offraient une meilleure protection cutanée en particulier les gants nitriles (39). En effet notre étude a constaté que les gants en nitrile diminuaient significativement les concentrations en pyrène, BaP et HAP totaux comparés aux autres types de gants. De plus, le Conseil Supérieur de la Santé préconise le port de sous gants nitrile sous les gants de feu, en raison du risque cancérigène de l'activité des SP, comparé à un risque négligeable de brûlure (40).

Comme Nicolas Cherry et al. 2019, nous avons observé des différences significatives chez les sujets portant des gants et un EPR mais pas de différence significative pour la douche (20). Le groupe ayant pris une douche était exclusivement composé d'OTR ou de pilote alors que le groupe n'en ayant pas pris était pour moitié composé de RESPEX, DIREX ou logisticienne. On peut supposer que les SP prenant une douche sont ceux les plus contaminés (pilotes et OTR) et ceux n'en prenant pas (DIREX, RESPEX et logisticienne) sont les moins contaminés d'où l'absence de différence significative.

On peut se poser la question de l'efficacité de la tenue de feu sur la protection des SP aux produits de combustion. Katherine M. Kirk et al. 2019 ont mesurés l'ambiance atmosphérique générée par un simulateur comparable à notre étude à l'intérieur et à l'extérieur de la tenue de feu (41). Leur étude retrouve une

diminution d'un facteur 2 des polluants mesurés tels que le benzène ou d'autres COV à l'intérieur des tenues. Il serait intéressant de faire une autre étude sur le PLT2 avec des patchs tests en dessous et hors de la tenue de feu pour mesurer le passage de particules fines sous ou à travers la tenue.

## **Forces de l'étude**

Cette étude est originale car elle propose pour la première fois des analyses de biométrie urinaires, cutanées et atmosphériques couplées à une analyse vidéo des pratiques professionnelles ce qui permet d'examiner dans sa globalité les principales voies d'exposition. De plus, nos sujets étant presque tous non-fumeurs, cela confère peu de biais dans l'interprétation des concentrations d'HAP urinaires. Tous les SP testés ont été prélevés durant le premier jour de leur semaine, de même aucun SP n'a déclaré de consommation de produits grillés ou barbecue la veille du prélèvement ce qui conforte une fois de plus l'exposition professionnelle aux HAP. Les mesures d'ambiance atmosphériques d'HAP gazeux et particulaires, bien qu'elles n'aient pas été réalisées le même jour, sont comparables puisque les exercices réalisés étaient identiques. Les prélèvements de surface cutanés ont été tous réalisés par le même investigateur de façon standardisé et pour une surface cutanée équivalente pour chaque sujet.

## **Faiblesses de l'étude**

Notre population étant presque exclusivement masculine nous avons peu de recul sur une potentielle variation des expositions hommes-femmes. Même si notre population globale de formateurs est suffisante (n=22), certains sous-groupes avaient un effectif très faible (Pilote, DIREX, RESPEX et logisticienne), diminuant la puissance statistique. Lors de l'analyse vidéo nous n'avons pas pu filmer tous les sujets inclus dans l'étude, ce qui ouvre un biais sur de possibles comportements diminuant ou majorant l'exposition qui n'ont pas pu être observés. Les capteurs passifs utilisés pour les prélèvements d'ambiances atmosphériques ne reflètent pas de manière réelle l'inhalation des SP durant l'exercice. Certains prélèvements par

lingette ont pu être sous-estimés par un effet « lavage » à cause de la sudation excessive des SP.

## Recommandations pour le SDIS 38

- 1) Éloignement des agents d'au moins 10 mètres du SMV avant d'enlever l'ARI et se restaurer (dans la zone repos ou brancard).
- 2) Création d'un zonage clair et visible avec des recommandations sur l'EPR (ARI ou masque FFP3A dans la zone rouge à proximité immédiate du SMV). Éloignement de la zone de repos et de débriefing du SMV.
- 3) Port de sous gants nitrile et changement réguliers des sous gants pendant l'exercice. Uniformisation des sous gants : un seul choix de gant qui nécessite une maîtrise des produits achetés, qui doivent être validés à l'échelle départementale.
- 4) Proscrire le déblaiement manuel à la pelle, mettre en place un système de trappe ou de nettoyage du foyer à froid pour éviter la mise en suspension des particules.
- 5) Identification et explication du circuit de décontamination pour les formateurs et les stagiaires. Standardiser l'habillement et le déshabillage (retirer la tenue par l'intérieur avec des gants et un masque FFP3A)
- 6) Nettoyage des tenues : machine dédiée au lavage de l'ensemble des EPI et des sous-vêtements techniques (éviter la contamination des foyers ou des autres SP si lavage en caserne)
- 7) Réflexions sur l'efficacité des tenues vis-à-vis des nanoparticules
- 8) Découpe des palettes à la scie avec une protection auditive, respiratoire (masque FFP3) et des gants de protection.
- 9) Critères de surveillance pour tous les formateurs de plus d'un an d'exposition : prévoir une cytologie urinaire tous les six mois, 20 ans après le début de l'exposition (42).

10) Prévention de santé publique sur le tabac

11) Promouvoir une formation d'hygiène pour les formateurs avec un réactualisation des connaissances

## CONCLUSION

Les expositions des pilotes et des OTR dépassent souvent les VBI européennes du métabolite du pyrène et du benzo(a)pyrène avec une prédominance de la voie cutanée comparée à la voie inhalatrice. Nos conclusions renforcent les observations déjà mesurées dans de nombreuses études incriminant la voie cutanée comme voie majeure d'exposition aux HAP. L'exposition respiratoire intervient également lors de l'enlèvement des ARI et des phases sans masque à proximité des conteneurs et au milieu des fumées. Concernant les analyses vidéo des pratiques professionnelles, les comportements individuels influent fortement l'exposition interne (pas de port de sous gants pour les pilotes et OTR, manipulation du matériel sale sans gants, retrait des EPR (ARI ou masque) à proximité immédiate du caisson, se reposer sans EPR ou débriefer proche du caisson). Il serait intéressant de réaliser une nouvelle campagne de prélèvements à distance des recommandations émises à la suite de cette étude pour mesurer l'impact sur l'exposition des formateurs. Ce travail a donc permis de mettre en évidence une surexposition aux fumées de combustion, notamment HAP, chez une partie de cette population, et la nécessité d'agir sur plusieurs axes pour limiter les risques (tenue de travail, EPI, hygiène, éloignement des zones de repos, limitation de la durée de présence dans les conteneurs, protocoliser les décontaminations de matériels, vérification de l'efficacité des tenues vis-à-vis des particules fines et ultrafines). La prise en compte de ces résultats dans l'adaptation de la surveillance médicale de cette population apparaît importante.

THÈSE SOUTENUE PAR : Pauline ZANGL

TITRE :

Evaluation de l'exposition professionnelle aux polluants des fumées de combustion de bois chez des pompiers formateurs intervenant dans une structure de feu contrôlé

CONCLUSION :

Les sapeurs-pompiers de l'Isère bénéficient pour leur formation, depuis 2021, d'un simulateur multi-volumes regroupant une dizaine de conteneurs maritimes permettant de réaliser des exercices comme la progression en conditions réelles, la reconnaissance en milieu enfumé, le sauvetage de victime et l'extinction de foyer. Une évaluation des expositions professionnelles aux produits de combustion est par conséquent rendue nécessaire afin de vérifier la maîtrise des risques pour leur santé et l'efficacité des tenues de protection utilisées.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer le niveau de contamination interne au benzène et aux hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) d'une population de formateurs, au travers d'analyses vidéo des pratiques professionnelles visant à mieux analyser les déterminants significatifs de l'exposition, de métrologies d'ambiances, de prélèvements surfaciques cutanés, et d'indicateurs biologiques urinaires d'exposition. L'objectif secondaire est d'identifier les déterminants de l'exposition et d'émettre si nécessaire des recommandations de mesures de prévention et protection.

Une étude observationnelle a été réalisée d'avril à juillet 2023 sur une population de 22 sujets (21 pompiers formateurs incendies et une logisticienne), tous affectés en structure de feu contrôlé. Une analyse vidéo des pratiques professionnelles a été systématiquement réalisée avec le logiciel Captiv. Des prélèvements d'ambiance d'HAP (particulaires et gazeux) et de particules fines (PM1, PM2.5, PM10) ont été réalisés en parallèle afin de caractériser les aérosols de fumées de combustion. Des prélèvements de surface cutanés (lingettes) ont également été recueillis afin de mesurer les quantités d'HAP retrouvés au niveau du visage et du cou, ainsi que des mains. L'exposition interne a été mesurée par l'analyse urinaire des métabolites des HAP (1-hydroxypyrrène, du 3-hydroxy Benzo(a)Pyrène, 2 et 3-hydroxyfluorène et du 2 et 3-hydroxyphénanthrène) et du benzène (acide S-phényl mercapturique).

L'analyse vidéo a permis de mettre en évidence la diversité des pratiques professionnelles (déshabillage de la tenue de feu, nettoyage du matériel, port d'EPI à l'extérieur des conteneurs). Les prélèvements d'air ambiants mettent en évidence des concentrations importantes de particules fines (PM10), dominées par des particules de petite taille (PM2.5 voire PM1). Les HAP sont également retrouvés en concentrations importantes dans l'air autour des conteneurs. Au niveau biologique, alors que les expositions au benzène sont très faibles, celles aux HAP dépassent les seuils maximums recommandés en milieu professionnel chez 9 des 22 sujets étudiés (en particulier chez les OTR et pilotes), ainsi qu'une absorption cutanée importante. Les prélèvements cutanés par lingettes retrouvent des quantités d'HAP plus importantes chez les deux mêmes catégories d'agents, et une corrélation significative entre les quantités d'HAP mesurés sur la peau (au niveau du visage et du cou) et les concentrations urinaires de certains métabolites des HAP. Le port de gants en nitrile est associé à des quantités significativement plus faibles d'HAP sur les mains en comparaison des autres types de gants (latex, vinyle) ou de l'absence de gants. La prise de douche ou le changement de tenue vestimentaire à midi ne sont pas associés à des concentrations biologiques plus faibles en fin de journée.

Ce travail a donc permis de mettre en évidence une surexposition aux fumées de combustion, notamment HAP, chez une partie de cette population, et la nécessité d'agir sur plusieurs axes pour limiter les risques (tenue de travail, EPI, hygiène, éloignement des zones de repos, limitation de la durée de présence dans les conteneurs, protocoller les décontaminations de matériels, vérification de l'efficacité des tenues vis-à-vis des particules fines et ultrafines). La prise en compte de ces résultats dans l'adaptation de la surveillance médicale de cette population apparaît importante.

VU ET PERMIS D'IMPRIMER

Grenoble, le : 31/01/23

LE DOYEN DE LA FACULTÉ DE MÉDECINE



Pr Olivier PALOMBI  
Doyen de l'UFR de Médecine  
Par délégation  
du Président de l'UFR

Pr Olivier PALOMBI

LE PRÉSIDENT / LA PRÉSIDENTE DU JURY



Pr Arnaud SEIGNEURIN

## BIBLIOGRAPHIE

1. LOI n° 96-369 du 3 mai 1996 relative aux services d'incendie et de secours (1). NOR : INTX9400080L mai 3, 1996.
2. Le Sdis de l'Isère - Service Départemental d'Incendie et de Secours [Internet]. [cité 23 juill 2023]. Disponible sur: <https://www.sdis38.fr/53-le-sdis-de-l-isere.htm>
3. LOI n° 2021-1520 du 25 novembre 2021 visant à consolider notre modèle de sécurité civile et valoriser le volontariat des sapeurs-pompiers et les sapeurs-pompiers professionnels (1). 2021-1520 nov 25, 2021.
4. Service Départemental d'Incendie et de Secours de l'Isère [Internet]. 2022 [cité 13 juill 2023]. Activité opérationnelle de 2021. Disponible sur: <https://www.sdis38.fr/actualite/89/44-activite-operationnelle-2021.htm>
5. Article R1424-26 - Code général des collectivités territoriales - Légifrance [Internet]. [cité 30 juill 2023]. Disponible sur: [https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article\\_lc/LEGIARTI000045656418/2022-04-17](https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000045656418/2022-04-17)
6. SDIS Isère [Internet]. [cité 30 juill 2023]. Organisation administrative - Service Départemental d'Incendie et de Secours. Disponible sur: <https://www.sdis38.fr/63-organisation-administrative.htm>
7. Sous-section 4 : Sous-direction santé (Articles R1424-24 à R1424-28) - Légifrance [Internet]. [cité 30 juill 2023]. Disponible sur: <https://www.legifrance.gouv.fr/codes/id/LEGIARTI000045656434/2022-04-17>
8. Pourny C. Synthèse du rapport de mission sur la sécurité des sapeurs-pompiers en intervention. Ministère de l'intérieur, de la sécurité intérieure et des libertés locales; 2003 déc p. 24 p. (Mission sécurité des sapeurs-pompiers, 9).
9. Direction Générale de la Sécurité Civile et de la Gestion des Crises. Les statistiques des services d'incendie et de secours [Internet]. 2022 [cité 9 août 2023]. Disponible sur: <https://www.interieur.gouv.fr/Publications/Statistiques/Securite-civile/2021>
10. SDIS 38. Règlement intérieur. 2022.
11. Arrêté du 6 mai 2000 fixant les conditions d'aptitude médicale des sapeurs-pompiers professionnels et volontaires et les conditions d'exercice de la médecine professionnelle et préventive au sein des services départementaux d'incendie et de secours - Légifrance [Internet]. Disponible sur: <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000765094/2022-05-23/>
12. IARC Working Group on the Identification of Carcinogenic Hazards to Humans. Occupational exposure as a firefighter Vol. 132 [Internet]. IARC; 2023 p. 1-730. Disponible sur: <https://publications.iarc.fr/615>

13. Daniels RD, Kubale TL, Yiin JH, Dahm MM, Hales TR, Baris D, et al. Mortality and cancer incidence in a pooled cohort of US firefighters from San Francisco, Chicago and Philadelphia (1950–2009). *Occup Environ Med.* juin 2014;71(6):388-97.
14. Glass DC, Del Monaco A, Pircher S, Vander Hoorn S, Sim MR. Mortality and cancer incidence at a fire training college. *Occup Med.* oct 2016;66(7):536-42.
15. Demers PA, DeMarini DM, Fent KW, Glass DC, Hansen J, Adetona O, et al. Carcinogenicity of occupational exposure as a firefighter. *Lancet Oncol.* août 2022;23(8):985-6.
16. Recensement des substances toxiques (ayant un impact potentiel à court, moyen et long terme) susceptibles d'être émises par un incendie - Ω 16 [Internet]. INERIS; 2022 juill p. 109 p. Report No.: Ineris-203887-2079442-v3.0. Disponible sur: <https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/Evaluation%20de%20l%27impact%20environnemental%20des%20incendies%20v3.pdf>
17. Barros B, Oliveira M, Morais S. Biomonitoring of firefighting forces: a review on biomarkers of exposure to health-relevant pollutants released from fires. *J Toxicol Environ Health Part B.* 3 avr 2023;26(3):127-71.
18. Allonneau A, Mercier S, Menguy-Fleuriot A, Luu SC, Louyot C, Nicolas A, et al. Étude de l'exposition aux fumées d'incendie des sapeurs-pompiers affectés en structure de feu contrôlé. *Arch Mal Prof Environ.* sept 2019;80(4):257-72.
19. Risques sanitaires liés aux expositions professionnelles des sapeurs-pompiers [Internet]. ANSES; 2019 août. Report No.: n°2018-SA-0066 – Pompiers. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2018SA0066Ra.pdf>
20. Cherry N, Aklilu Y abeba, Beach J, Britz-McKibbin P, Elbourne R, Galarneau JM, et al. Urinary 1-hydroxypyrene and Skin Contamination in Firefighters Deployed to the Fort McMurray Fire. *Ann Work Expo Health.* 19 avr 2019;63(4):448-58.
21. Mayer AC, Fent KW, Bertke S, Horn GP, Smith DL, Kerber S, et al. Firefighter hood contamination: Efficiency of laundering to remove PAHs and FRs. *J Occup Environ Hyg.* 1 févr 2019;16(2):129-40.
22. Richardson A, Terrazzini N, Gage C, Lee BJ, Bradley R, Watt P, et al. Inflammatory and psychological consequences of chronic high exposure firefighting. *J Therm Biol.* janv 2023;111:103399.
23. The American Cancer Society medical and editorial content team. Perfluorooctanoic Acid (PFOA), Perfluorooctane Sulfonate (PFOS), and Related Chemicals [Internet]. American Cancer Society; 2023 mars [cité 20 août 2023] p. 1-10 p. Disponible sur: <https://www.cancer.org/content/dam/CRC/PDF/Public/7009.00.pdf>
24. Trowbridge J, Gerona R, McMaster M, Ona K, Clarity C, Bessonneau V, et al. Organophosphate and Organohalogen Flame-Retardant Exposure and Thyroid Hormone Disruption in a Cross-Sectional Study of Female Firefighters and Office Workers from San

Francisco. Environ Sci Technol. 4 janv 2022;56(1):440-50.

25. Banks APW, Engelsman M, He C, Wang X, Mueller JF. The occurrence of PAHs and flame-retardants in air and dust from Australian fire stations. J Occup Environ Hyg. 3 mars 2020;17(2-3):73-84.
26. Cancer de la vessie et facteurs de risque • Cancer Environnement [Internet]. Cancer Environnement. [cité 20 août 2023]. Disponible sur: <https://www.cancer-environnement.fr/fiches/cancers/cancer-de-la-vessie/>
27. Benzène et effets sur la santé • Cancer Environnement [Internet]. Cancer Environnement. [cité 20 août 2023]. Disponible sur: <https://www.cancer-environnement.fr/fiches/expositions-environnementales/benzene/>
28. Fent KW, Eisenberg J, Evans D, Sammons D, Robertson S, Striley C, et al. Evaluation of Dermal Exposure to Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Fire Fighters [Internet]. Cincinnati: U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health; 2013 déc p. 1-5. Report No.: n° 2010-0156-3196. Disponible sur: <http://www.cdc.gov/niosh/hhe/reports/pdfs/2010-0156-3196.pdf>
29. Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide [Internet]. World Health Organization; 2021 p. 273 p. Disponible sur: <https://iris.who.int/handle/10665/345329>
30. Esteve W. Protocole de mise au point des méthodes de prélèvement surfacique et d'analyse des substances chimiques sur les surfaces de travail [Internet]. INRS; 2019 déc p. 30 p. Disponible sur: <https://www.inrs.fr/dms/inrs/PDF/metropol-analyse-validation-surfaces/metropol-analyse-validation-surfaces.pdf>
31. David E. Exposition au risque chimique par inhalation lors des entraînements en caisson de brûlage. UNIVERSITÉ TOULOUSE III – Paul SABATIER FACULTÉ DE MÉDECINE; 2018.
32. Cohen AJ, Samet JM, Straif K, éditeurs. Air pollution and cancer. Lyon: International Agency for Research on Cancer; 2013.
33. Wallace MAG, Pleil JD, Oliver KD, Whitaker DA, Mentese S, Fent KW, et al. Targeted GC-MS analysis of firefighters' exhaled breath: Exploring biomarker response at the individual level. J Occup Environ Hyg. 4 mai 2019;16(5):355-66.
34. Allonneau A, Mercier S, Rieunier F, Menguy-Fleuriot A, Louyot C, Duvollet M, et al. Exposure to fire smoke in fire training structures: A prospective observational study. Arch Environ Occup Health. 9 août 2022;77(7):586-97.
35. Hydrocarbures aromatiques polycycliques (-) / 1-Hydroxypyrrène urinaire - Biotox - INRS [Internet]. 2022 [cité 20 sept 2023]. Disponible sur: [https://www.inrs.fr/publications/bdd/biotox/dosage.html?refINRS=Dosage\\_151](https://www.inrs.fr/publications/bdd/biotox/dosage.html?refINRS=Dosage_151)

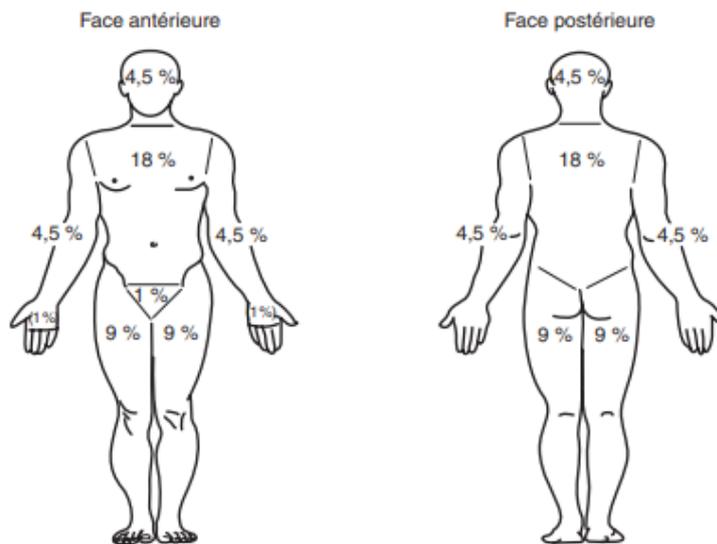
36. Systemic Exposure to PAHs and Benzene in Firefighters Suppressing Controlled Structure Fires. *Ann Occup Hyg* [Internet]. 6 juin 2014 [cité 4 juin 2023]; Disponible sur: <https://academic.oup.com/annweh/article/58/7/830/157036/Systemic-Exposure-to-PAHs-and-Benzene-in>
37. Kirk KM, Logan MB. Firefighting Instructors' Exposures to Polycyclic Aromatic Hydrocarbons During Live Fire Training Scenarios. *J Occup Environ Hyg*. 3 avr 2015;12(4):227-34.
38. Van Den Eijnde W, Heus R, Falcone D, Peppelman M, Van Erp P. Skin Barrier Impairment due to the Occlusive Effect of Firefighter Clothing. *Ann Work Expo Health*. 10 mars 2020;64(3):331-7.
39. Everaert S, Schoeters G, Claes K, Raquez JM, Buffel B, Vanhaecke T, et al. Balancing Acute and Chronic Occupational Risks: The Use of Nitrile Butadiene Rubber Undergloves by Firefighters to Reduce Exposure to Toxic Contaminants. *Toxics*. 15 juin 2023;11(6):534.
40. L'utilisation de sous-gants en nitrile sous les gants ordinaires des pompiers comme mesure de protection contre l'exposition aux substances cancérigènes dans les incendies. Bruxelles: Conseil Supérieur de la Santé; 2022 déc p. 46 p. Report No.: CSS n°9542.
41. Kirk KM, Logan MB. Exposures to air contaminants in compartment fire behavior training (CFBT) using particleboard fuel. *J Occup Environ Hyg*. 3 juill 2019;16(7):432-9.
42. Groupe de travail présidé par J.C. Pairon. Surveillance médico-professionnelle des travailleurs exposés ou ayant été exposés à des agents cancérigènes chimiques : application aux cancérigènes pour la vessie. INRS [Internet]. sept 2012 [cité 15 sept 2023];(n°131). Disponible sur: <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=TM%2024>

# ANNEXES

*Annexe 1 : Tableau récapitulatif des prélèvements et VBI*

<b>Nom du composé</b>	<b>Formule chimique</b>	<b>N°CAS</b>	<b>VBI urinaire Population générale</b>	<b>VBI urinaire en milieu de professionnel</b>	<b>Moment de prélèvement</b>	<b>Classification CIRC</b>
Pyrène	1-OHP	129-00-0	NF* : 0,1 µmol/mol de créatinine F* : 0,3 µmol/mol de créatinine (NHANES 2018 France)	1 µmol/mol de créatinine (Jongeneelen 2014 Pays-Bas)	DP, FP, FP+16h	3
Benzo(a)pyrène	3OHBaP	50-32-8	NF* : 0,02 nmol/mol de créatinine F* : 0,06 nmol/mol de créatinine (Lafontaine M 2006 France)	<0,4 nmol/mol de créatinine (INRS 2007 France)	DP, FP+16h	1
Benzène	S-PMA	71-43-2	NF* : <0,5 µg/g de créatinine (FIOH 2018) F* : 7 µg/g de créatinine (Bevan et al 2013 Royaume-Uni)	<2 µg/g de créatinine (RAC ECHA 2018 Europe)	DP,FP,FP+16h	1
Fluorène	2OHFluo	86-73-7	NF* : <0,4 µmol/mol de créatinine F* : <2,41 µmol/mol de créatinine (CDC 2015 USA)	Absence de valeur limite	DP, FP	3
	3OHFluo		NF* : <0,16 µmol/mol de créatinine F* : <1,28 µmol/mol de créatinine (CDC 2015 USA)			
Phénanthrène	2OHPhen	85-01-8	NF* : <0,12 µmol/mol de créatinine F* : <0,21 µmol/mol de créatinine (CDC 2015 USA)	Absence de valeur limite	DP, FP	3
	3OHPhen		NF* : <0,12 µmol/mol de créatinine F* : <0,27 µmol/mol de créatinine (CDC 2015 USA)			

Annexe 2 : Règle de Wallace. Annexe 10. Règle de WALLACE (évaluation de la surface brûlée). (2019). In 40 gestes et soins d'urgence pour les soignants (p. 93-94). Vuibert; Cairn.info.  
<https://www.cairn.info/40-gestes-et-soins-d-urgence-pour-les-soignants--9782311661330-p-93.htm>



Annexe 3 : Photo de deux hommes, à gauche homme en tenue de RESPEX ou DIREX, à droite homme en tenue de Pilote ou d'OTR



*Annexe 4 : Photo du PLT2*



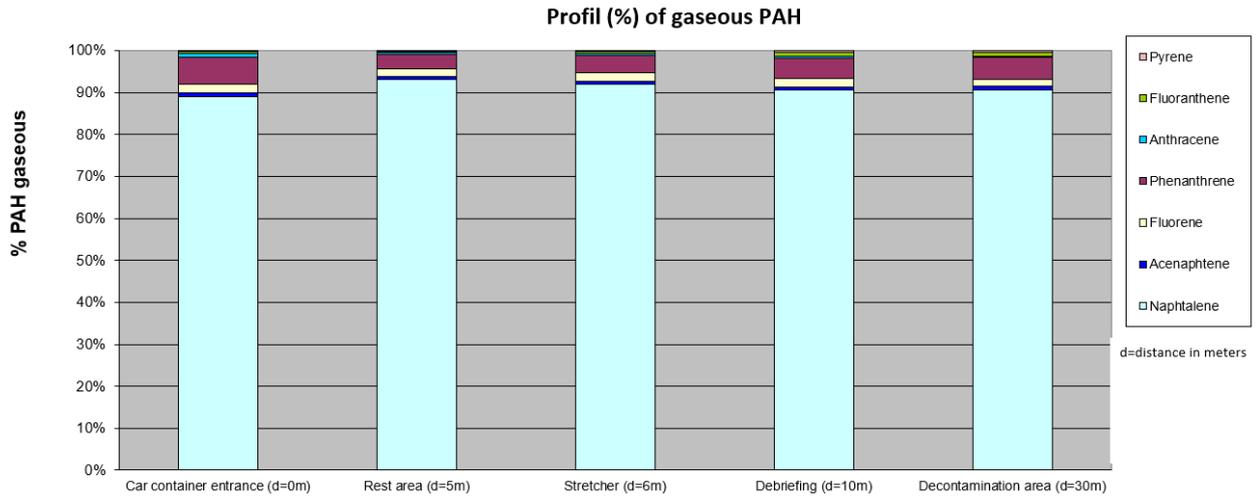
*Annexe 5 : Photo d'un OTR proche du SMV sans ARI*



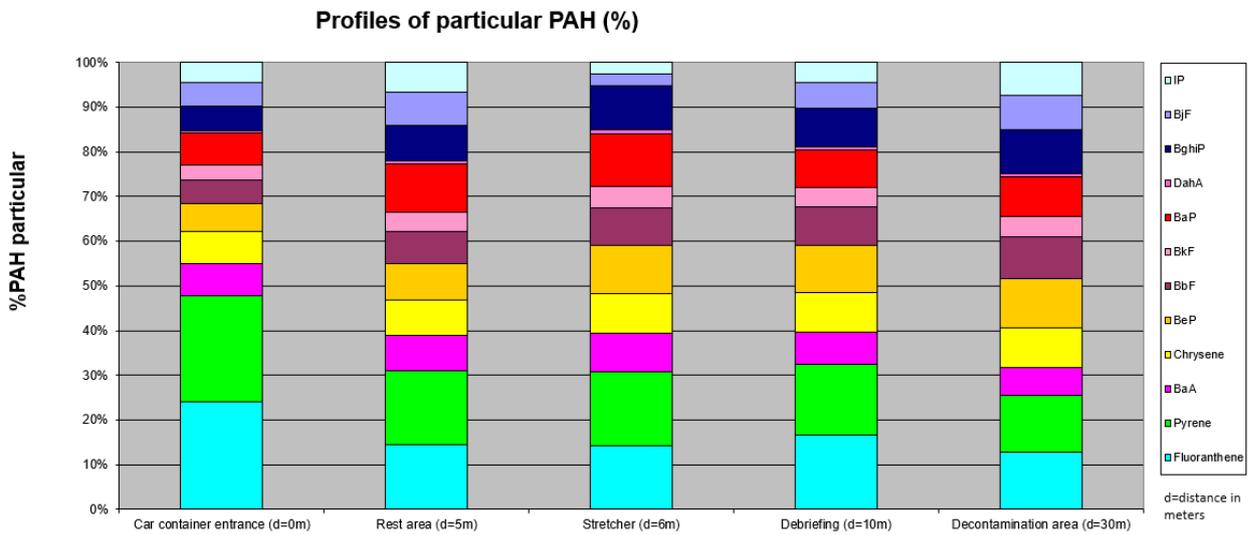
*Annexe 6 : Photo de deux formateurs*



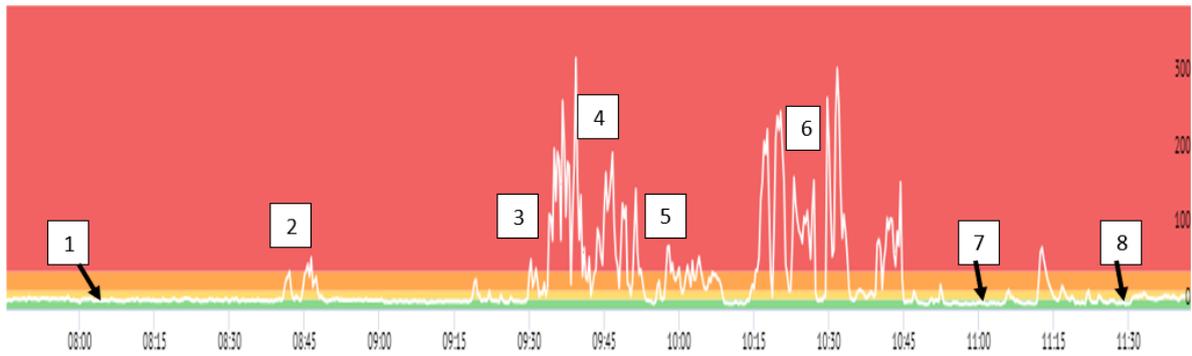
## Annexe 7 : Profil of gaseous PAH (%)



## Annexe 8 : Profiles of particular PAH (%)



### Annexe 9 : $PM_{2,5}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) in morning exercise versus time



1 : bruit de fond

2 : allumage du foyer

3 : début exercice (ouverture et fermeture de la porte du SMV)

4 : zone de repos pilote à proximité SMV

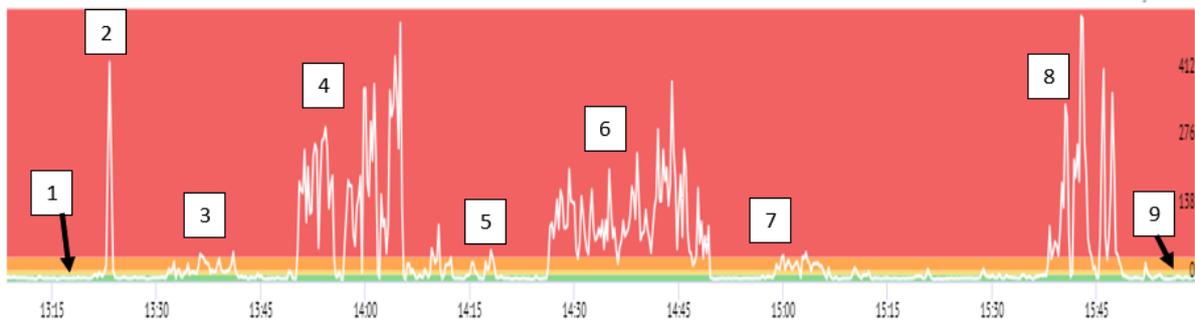
5 : zone débriefing RESPEX

6 : zone repos OTR à proximité SMV

7 : zone brancard

8 : local tactique/salle à manger

### Annexe 10 : $PM_{2,5}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) in afternoon exercise versus time



1 : bruit de fond

2 : mesure au sein du SMV foyer éteint

3 : allumage foyer

4 : en haut des escaliers

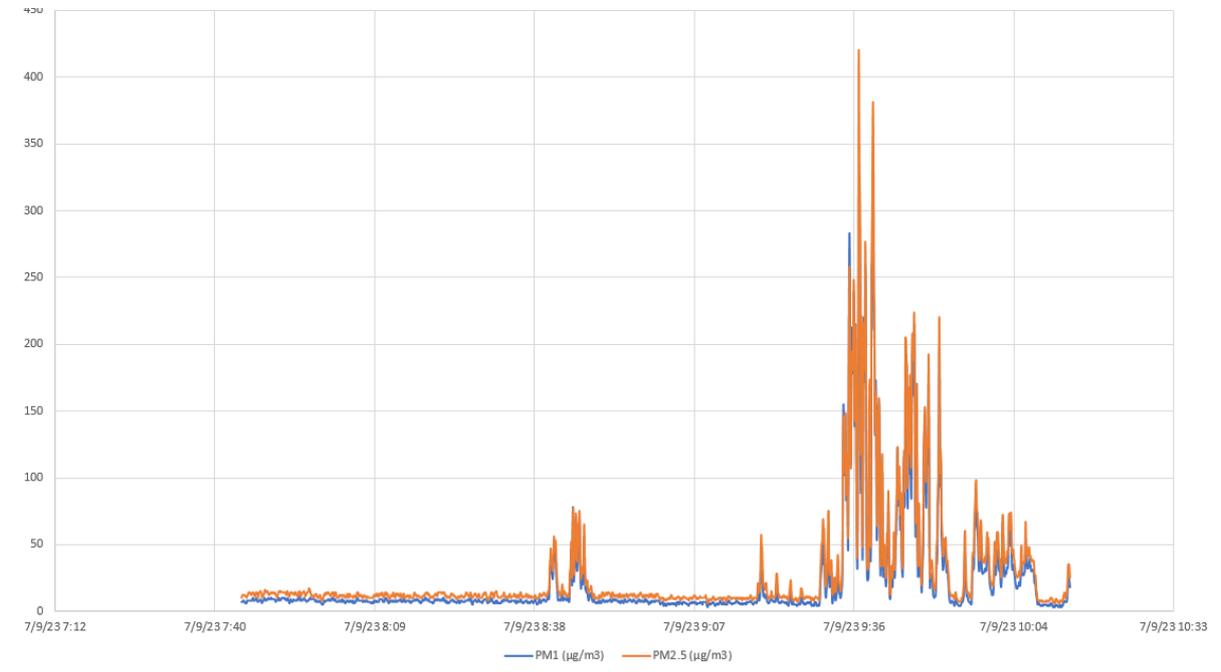
6 : zone repos pilote à proximité SMV

7 : zone débriefing en bas des escaliers

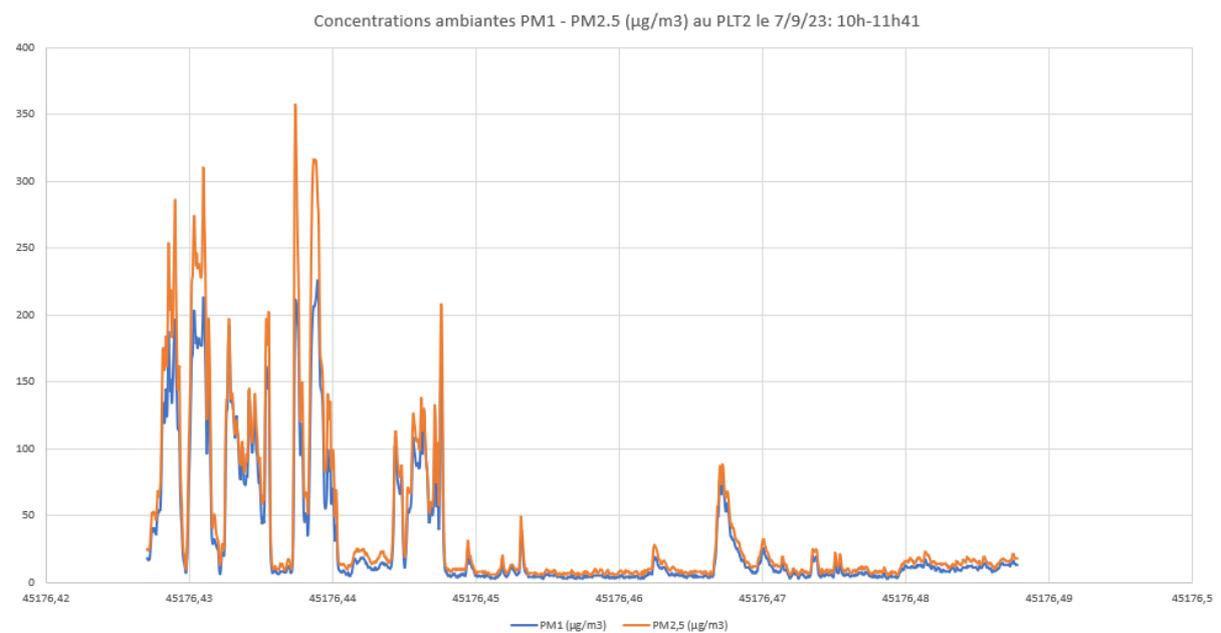
8 : ouverture COEPT avec fumées

9 : zone décontamination

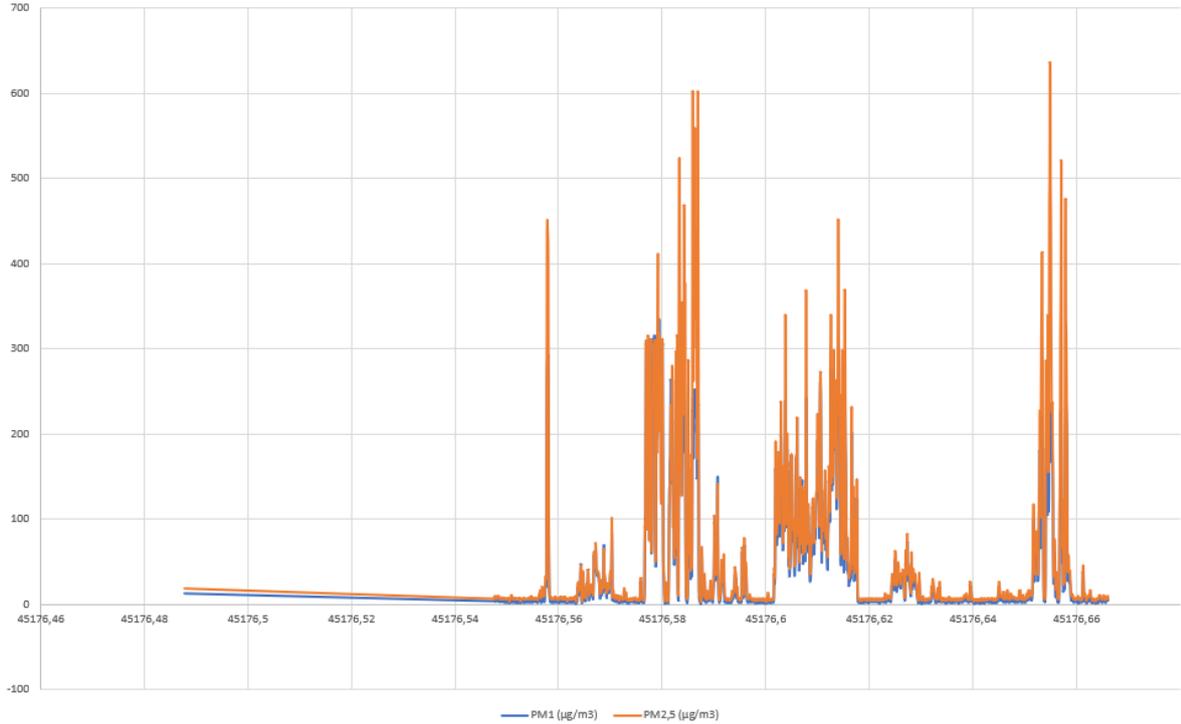
Annexe 11 : Concentrations ambiantes  $PM_1 - PM_{2,5}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) au PLT2 le 07/09/23 : 7h45-10h



Annexe 12 : Concentrations ambiantes  $PM_1 - PM_{2,5}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) au PLT2 le 07/09/23 : 10h-11h41



Annexe 13 : Concentrations ambiantes  $PM_1 - PM_{2,5}$  ( $\mu g/m^3$ ) au PLT2 le 07/09/23 : 13h08-15h50



*Annexe 14 : Average of pyrene and BaP on surface skin samples (ng/cm<sup>2</sup>)*

<b>Average of pyrene and BaP on surface skin samples ng/cm<sup>2</sup> (min; max)</b>	<b>Average of PYR per wipe</b>	<b>Average of BaP per wipe</b>
All wipes	5,1 (0,2 ; 24)	1,3 (<0,1 ; 10)
Face and neck	4,8 (0,1 ; 19)	0,9 (<0,1 ; 2,6)
Hands	5,5 (0,2 ; 24)	1,7 (0,1 ; 9,9)
RESPEX (n=2)	4,5 (1,2 ; 9,2)	1,0 (0,2 ; 2,3)
DIREX (n=1)	1,0 (1,0 ; 1,1)	0,2 (0,1 ; 0,2)
OTR (n=10)	5,3 (0,3 ; 20)	1,4 (0,1 ; 9,9)
LOGISTICIAN (n=1)	1,5 (0,2, 3,2)	0,3 (<0,1 ; 0,5)
PILOT (n=4)	7,0 (0,2 ; 24)	1,7 (0,1 ; 7,4)
All gloves	5,4 (0,2 ; 24)	1,4 (<0,1 ; 9,9)
Latex gloves (n=4)	3,8 (0,4 ; 14)	1,0 (0,1 ; 4,0)
Nitrile gloves (n=6)	4,2 (0,3 ; 19)	0,8 (<0,1 ; 2,6)
Vinyle gloves (n=5)	8,2 (1,2 ; 24)	2,5 (0,3 ; 9,9)

# Le serment d'Hippocrate

Texte revu par l'Ordre des médecins en 2012

“ **Au moment d'être admis(e) à exercer la médecine, je promets et je jure d'être fidèle aux lois de l'honneur et de la probité.**

Mon premier souci sera de rétablir, de préserver ou de promouvoir la santé dans tous ses éléments, physiques et mentaux, individuels et sociaux.

Je respecterai toutes les personnes, leur autonomie et leur volonté, sans aucune discrimination selon leur état ou leurs convictions. J'interviendrai pour les protéger si elles sont affaiblies, vulnérables ou menacées dans leur intégrité ou leur dignité. Même sous la contrainte, je ne ferai pas usage de mes connaissances contre les lois de l'humanité.

J'informerai les patients des décisions envisagées, de leurs raisons et de leurs conséquences.

Je ne tromperai jamais leur confiance et n'exploiterai pas le pouvoir hérité des circonstances pour forcer les consciences.

Je donnerai mes soins à l'indigent et à quiconque me les demandera. Je ne me laisserai pas influencer par la soif du gain ou la recherche de la gloire.

Admis(e) dans l'intimité des personnes, je tairai les secrets qui me seront confiés. Reçu(e) à l'intérieur des maisons, je respecterai les secrets des foyers et ma conduite ne servira pas à corrompre les mœurs.

Je ferai tout pour soulager les souffrances. Je ne prolongerai pas abusivement les agonies. Je ne provoquerai jamais la mort délibérément.

Je préserverai l'indépendance nécessaire à l'accomplissement de ma mission. Je n'entreprendrai rien qui dépasse mes compétences. Je les entretiendrai et les perfectionnerai pour assurer au mieux les services qui me seront demandés.

J'apporterai mon aide à mes confrères ainsi qu'à leurs familles dans l'adversité. Que les hommes et mes confrères m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses ; que je sois déshonoré(e) et méprisé(e) si j'y manque.

”