

THÈSE
POUR LE DIPLÔME D'ÉTAT DE DOCTEUR EN MÉDECINE
SPÉCIALITÉ MÉDECINE GÉNÉRALE

Présentée et soutenue publiquement le 15 Mai 2018

par

Emmanuel DAVID

Évaluation du risque chimique par inhalation
lors des entraînements en caisson de brûlage

Étude quantitative auprès des pompiers formateurs au SDIS de l'Aveyron

DIRECTEUR DE THÈSE: Docteur MAVIEL Patrick

Jury :

Monsieur le Professeur MESTHÉ Pierre	Président de jury
Monsieur le Professeur POUTRAIN Jean-Christophe	Assesseur
Monsieur le Docteur HERIN Fabrice	Assesseur
Monsieur le Docteur MAVIEL Patrick	Assesseur

TABLEAU du PERSONNEL HU
des Facultés de Médecine de l'Université Paul Sabatier
au 1^{er} septembre 2017

Professeurs Honoraires

Doyen Honoraire	M. ROUGE Daniel	Professeur Honoraire	M. VIRENQUE Christian
Doyen Honoraire	M. LAZORTHES Yves	Professeur Honoraire	M. CARLES Pierre
Doyen Honoraire	M. CHAP Hugues	Professeur Honoraire	M. BONAFÉ Jean-Louis
Doyen Honoraire	M. GUIRAUD-CHAUMEIL Bernard	Professeur Honoraire	M. VAYSSE Philippe
Doyen Honoraire	M. PUEL Pierre	Professeur Honoraire	M. ESQUERRE J.P.
Professeur Honoraire	M. ESCHAPASSE Henri	Professeur Honoraire	M. GUITARD Jacques
Professeur Honoraire	M. GEDEON André	Professeur Honoraire	M. LAZORTHES Franck
Professeur Honoraire	M. PASQUIE M.	Professeur Honoraire	M. ROQUE-LATRILLE Christian
Professeur Honoraire	M. RIBAUT Louis	Professeur Honoraire	M. CERENE Alain
Professeur Honoraire	M. ARLET Jacqueline	Professeur Honoraire	M. FOURNIAL Gérard
Professeur Honoraire	M. RIBET André	Professeur Honoraire	M. HOFF Jean
Professeur Honoraire	M. MONROZIES M.	Professeur Honoraire	M. REME Jean-Michel
Professeur Honoraire	M. DALOUS Antoine	Professeur Honoraire	M. FAUVEL Jean-Marie
Professeur Honoraire	M. DUPRE M.	Professeur Honoraire	M. FREXINOS Jacques
Professeur Honoraire	M. FABRE Jean	Professeur Honoraire	M. CARRIERE Jean-Paul
Professeur Honoraire	M. DUCOS Jean	Professeur Honoraire	M. MANSAT Michel
Professeur Honoraire	M. LACOMME Yves	Professeur Honoraire	M. BARRET André
Professeur Honoraire	M. COTONAT Jean	Professeur Honoraire	M. ROLLAND
Professeur Honoraire	M. DAVID Jean-Frédéric	Professeur Honoraire	M. THOUVENOT Jean-Paul
Professeur Honoraire	Mme DIDIER Jacqueline	Professeur Honoraire	M. CAHUZAC Jean-Philippe
Professeur Honoraire	Mme LARENG Marie-Blanche	Professeur Honoraire	M. DELSOL Georges
Professeur Honoraire	M. BERNADET	Professeur Honoraire	M. ABBAL Michel
Professeur Honoraire	M. REGNIER Claude	Professeur Honoraire	M. DURAND Dominique
Professeur Honoraire	M. COMBELLES	Professeur Honoraire	M. DALY-SCHWEITZER Nicolas
Professeur Honoraire	M. REGIS Henri	Professeur Honoraire	M. RAILHAC
Professeur Honoraire	M. ARBUS Louis	Professeur Honoraire	M. POURRAT Jacques
Professeur Honoraire	M. PUJOL Michel	Professeur Honoraire	M. QUERLEU Denis
Professeur Honoraire	M. ROCHICCIOLI Pierre	Professeur Honoraire	M. ARNE Jean-Louis
Professeur Honoraire	M. RUMEAU Jean-Louis	Professeur Honoraire	M. ESCOURROU Jean
Professeur Honoraire	M. BESOMBES Jean-Paul	Professeur Honoraire	M. FORTANIER Gilles
Professeur Honoraire	M. SUC Jean-Michel	Professeur Honoraire	M. LAGARRIGUE Jacques
Professeur Honoraire	M. VALDIGUIE Pierre	Professeur Honoraire	M. PESSEY Jean-Jacques
Professeur Honoraire	M. BOUNHOURE Jean-Paul	Professeur Honoraire	M. CHAVOIN Jean-Pierre
Professeur Honoraire	M. CARTON Michel	Professeur Honoraire	M. GERAUD Gilles
Professeur Honoraire	Mme PUEL Jacqueline	Professeur Honoraire	M. PLANTE Pierre
Professeur Honoraire	M. GOUZI Jean-Louis	Professeur Honoraire	M. MAGNAVAL Jean-François
Professeur Honoraire associé	M. DUTAU Guy	Professeur Honoraire	M. MONROZIES Xavier
Professeur Honoraire	M. PASCAL J.P.	Professeur Honoraire	M. MOSCOVICI Jacques
Professeur Honoraire	M. SALVADOR Michel	Professeur Honoraire	Mme GENESTAL Michèle
Professeur Honoraire	M. BAYARD Francis	Professeur Honoraire	M. CHAMONTIN Bernard
Professeur Honoraire	M. LEOPHONTE Paul	Professeur Honoraire	M. SALVAYRE Robert
Professeur Honoraire	M. FABIÉ Michel	Professeur Honoraire	M. FRAYSSE Bernard
Professeur Honoraire	M. BARTHE Philippe	Professeur Honoraire	M. BUGAT Roland
Professeur Honoraire	M. CABARROT Etienne	Professeur Honoraire	M. PRADERE Bernard
Professeur Honoraire	M. DUFFAUT Michel	Professeur Honoraire	M. CHAP Hugues
Professeur Honoraire	M. ESCANDE Michel	Professeur Honoraire	M. LAURENT Guy
Professeur Honoraire	M. PRIS Jacques	Professeur Honoraire	M. ARLET Philippe
Professeur Honoraire	M. CATHALA Bernard	Professeur Honoraire	Mme MARTY Nicole
Professeur Honoraire	M. BAZEX Jacques	Professeur Honoraire	M. MASSIP Patrice
		Professeur Honoraire	M. CLANET Michel

Professeurs Émérites

Professeur ALBAREDE Jean-Louis	Professeur MAZIERES Bernard
Professeur CONTÉ Jean	Professeur ARLET-SUAU Elisabeth
Professeur MURAT	Professeur SIMON Jacques
Professeur MANELFE Claude	Professeur FRAYSSE Bernard
Professeur LOUVET P.	Professeur ARBUS Louis
Professeur SARRAMON Jean-Pierre	Professeur CHAMONTIN Bernard
Professeur CARATERO Claude	Professeur SALVAYRE Robert
Professeur GUIRAUD-CHAUMEIL Bernard	Professeur MAGNAVAL Jean-François
Professeur COSTAGLIOLA Michel	Professeur ROQUES-LATRILLE Christian
Professeur ADER Jean-Louis	Professeur MOSCOVICI Jacques
Professeur LAZORTHES Yves	Professeur LAGARRIGUE Jacques
Professeur LARENG Louis	Professeur CHAP Hugues
Professeur JOFFRE Francis	Professeur LAURENT Guy
Professeur BONEU Bernard	Professeur MASSIP Patrice
Professeur DABERNAT Henri	
Professeur BOCCALON Henri	

FACULTE DE MEDECINE TOULOUSE-PURPAN

37 allées Jules Guesde - 31062 TOULOUSE Cedex

Doyen : D. CARRIE

P.U. - P.H. Classe Exceptionnelle et 1ère classe		P.U. - P.H. 2ème classe	
M. ADOUE Daniel (C.E)	Médecine Interne, Gériatrie	Mme BONGARD Vanina	Epidémiologie
M. AMAR Jacques	Thérapeutique	M. BONNEVIALLE Nicolas	Chirurgie orthopédique et traumatologique
M. ATTAL Michel (C.E)	Hématologie	M. BUREAU Christophe	Hépatogastro-entéro
M. AVET-LOISEAU Hervé	Hématologie, transfusion	M. CALVAS Patrick	Génétique
Mme BEYNE-RAUZY Odile	Médecine Interne	M. CARRERE Nicolas	Chirurgie Générale
M. BIRMES Philippe	Psychiatrie	Mme CASPER Charlotte	Pédiatrie
M. BLANCHER Antoine	Immunologie (option Biologique)	M. CHAIX Yves	Pédiatrie
M. BONNEVIALLE Paul	Chirurgie Orthopédique et Traumatologie.	Mme CHARPENTIER Sandrine	Thérapeutique, méd. d'urgence, addict
M. BOSSAVY Jean-Pierre	Chirurgie Vasculaire	M. COGNARD Christophe	Neuroradiologie
M. BRASSAT David	Neurologie	M. FOURNIE Bernard	Rhumatologie
M. BROUCHET Laurent	Chirurgie thoracique et cardio-vascul	M. FOURNIÉ Pierre	Ophtalmologie
M. BROUSSET Pierre (C.E)	Anatomie pathologique	M. GAME Xavier	Urologie
M. CARRIE Didier (C.E)	Cardiologie	M. LAROCHE Michel	Rhumatologie
M. CHAUCHEAU Dominique	Néphrologie	M. LEOBON Bertrand	Chirurgie Thoracique et Cardiaque
M. CHOLLET François (C.E)	Neurologie	M. LOPEZ Raphael	Anatomie
M. DAHAN Marcel (C.E)	Chirurgie Thoracique et Cardiaque	M. MARX Mathieu	Oto-rhino-laryngologie
M. DE BOISSEZON Xavier	Médecine Physique et Réadapt Fonct.	M. MAS Emmanuel	Pédiatrie
M. DEGUINE Olivier	Oto-rhino-laryngologie	M. OLIVOT Jean-Marc	Neurologie
M. DUCOMMUN Bernard	Cancérologie	M. PARANT Olivier	Gynécologie Obstétrique
M. FERRIERES Jean	Epidémiologie, Santé Publique	M. PAYRASTRE Bernard	Hématologie
M. FOURCADE Olivier	Anesthésiologie	M. PERON Jean-Marie	Hépatogastro-entérologie
M. GEERAERTS Thomas	Anesthésiologie et réanimation	M. PORTIER Guillaume	Chirurgie Digestive
M. IZOPET Jacques (C.E)	Bactériologie-Virologie	M. RONCALLI Jérôme	Cardiologie
Mme LAMANT Laurence	Anatomie Pathologique	Mme SAVAGNER Frédéric	Biochimie et biologie moléculaire
M. LANG Thierry (C.E)	Biostatistiques et Informatique Médicale	M. SOL Jean-Christophe	Neurochirurgie
M. LANGIN Dominique	Nutrition		
M. LAUQUE Dominique (C.E)	Médecine Interne		
M. LAUWERS Frédéric	Anatomie		
M. LIBLAU Roland (C.E)	Immunologie		
M. MALAVAUD Bernard	Urologie		
M. MANSAT Pierre	Chirurgie Orthopédique		
M. MARCHOU Bruno (C.E)	Maladies Infectieuses		
M. MAZIERES Julien	Pneumologie		
M. MOLINIER Laurent	Epidémiologie, Santé Publique		
M. MONTASTRUC Jean-Louis (C.E)	Pharmacologie		
Mme MOYAL Elisabeth	Cancérologie		
Mme NOURHASHEMI Fatemeh (C.E)	Gériatrie		
M. OLIVES Jean-Pierre (C.E)	Pédiatrie		
M. OSWALD Eric	Bactériologie-Virologie		
M. PARIENTE Jérémie	Neurologie		
M. PARINAUD Jean (C.E)	Biol. Du Dévelop. et de la Reprod.		
M. PAUL Carle	Dermatologie		
M. PAYOUX Pierre	Biophysique		
M. PERRET Bertrand (C.E)	Biochimie		
M. RASCOL Olivier (C.E)	Pharmacologie		
M. RECHER Christian	Hématologie		
M. RISCHMANN Pascal	Urologie		
M. RIVIERE Daniel (C.E)	Physiologie		
M. SALES DE GAUZY Jérôme	Chirurgie Infantile		
M. SALLES Jean-Pierre	Pédiatrie		
M. SANS Nicolas	Radiologie		
Mme SELVES Janick	Anatomie et cytologie pathologiques		
M. SERRE Guy (C.E)	Biologie Cellulaire		
M. TELMON Norbert	Médecine Légale		
M. VINEL Jean-Pierre (C.E)	Hépatogastro-entérologie		
P.U. Médecine générale		P.U. Médecine générale	
M. OUSTRIC Stéphane	Médecine Générale	M. MESTHÉ Pierre	Médecine Générale
		P.A Médecine générale	
		POUTRAIN Jean-Christophe	Médecine Générale

FACULTE DE MEDECINE TOULOUSE-RANGUEIL

133, route de Narbonne - 31062 TOULOUSE Cedex

Doyen : E. SERRANO

P.U. - P.H.

Classe Exceptionnelle et 1ère classe

M. ACAR Philippe	Pédiatrie
M. ALRIC Laurent	Médecine Interne
Mme ANDRIEU Sandrine	Epidémiologie
M. ARNAL Jean-François	Physiologie
Mme BERRY Isabelle (C.E)	Biophysique
M. BOUTAULT Franck (C.E)	Chirurgie Maxillo-Faciale et Stomatologie
M. BUJAN Louis (C. E)	Urologie-Andrologie
Mme BURA-RIVIERE Alessandra	Médecine Vasculaire
M. BUSCAIL Louis (C.E)	Hépatogastro-Entérologie
M. CANTAGREL Alain (C.E)	Rhumatologie
M. CARON Philippe (C.E)	Endocrinologie
M. CHIRON Philippe (C.E)	Chirurgie Orthopédique et Traumatologie
M. CONSTANTIN Arnaud	Rhumatologie
M. COURBON Frédéric	Biophysique
Mme COURTADE SAIDI Monique	Histologie Embryologie
M. DAMBRIN Camille	Chirurgie Thoracique et Cardiovasculaire
M. DELABESSE Eric	Hématologie
Mme DELISLE Marie-Bernadette (C.E)	Anatomie Pathologie
M. DELORD Jean-Pierre	Cancérologie
M. DIDIER Alain (C.E)	Pneumologie
Mme DULY-BOUHANICK Béatrice	Thérapeutique
M. ELBAZ Meyer	Cardiologie
M. GALINIER Michel	Cardiologie
M. GALINIER Philippe	Chirurgie Infantile
M. GLOCK Yves (C.E)	Chirurgie Cardio-Vasculaire
M. GOURDY Pierre	Endocrinologie
M. GRAND Alain (C.E)	Epidémiologie. Eco. de la Santé et Prévention
M. GROLLEAU RAOUX Jean-Louis	Chirurgie plastique
Mme GUIMBAUD Rosine	Cancérologie
Mme HANAIRE Hélène (C.E)	Endocrinologie
M. KAMAR Nassim	Néphrologie
M. LARRUE Vincent	Neurologie
M. LEVADE Thierry (C.E)	Biochimie
M. MALECAZE François (C.E)	Ophtalmologie
M. MARQUE Philippe	Médecine Physique et Réadaptation
Mme MAZEREEUW Juliette	Dermatologie
M. MINVILLE Vincent	Anesthésiologie Réanimation
M. RAYNAUD Jean-Philippe (C.E)	Psychiatrie Infantile
M. RITZ Patrick	Nutrition
M. ROCHE Henri (C.E)	Cancérologie
M. ROLLAND Yves (C.E)	Gériatrie
M. ROUGE Daniel (C.E)	Médecine Légale
M. ROUSSEAU Hervé (C.E)	Radiologie
M. ROUX Franck-Emmanuel	Neurochirurgie
M. SAILLER Laurent	Médecine Interne
M. SCHMITT Laurent (C.E)	Psychiatrie
M. SENARD Jean-Michel (C.E)	Pharmacologie
M. SERRANO Elie (C.E)	Oto-rhino-laryngologie
M. SOULAT Jean-Marc	Médecine du Travail
M. SOULIE Michel (C.E)	Urologie
M. SUC Bertrand	Chirurgie Digestive
Mme TAUBER Marie-Thérèse (C.E)	Pédiatrie
Mme URO-COSTE Emmanuelle	Anatomie Pathologique
M. VAYSSIERE Christophe	Gynécologie Obstétrique
M. VELLAS Bruno (C.E)	Gériatrie

P.U. - P.H.

2ème classe

M. ACCADBLED Franck	Chirurgie Infantile
M. ARBUS Christophe	Psychiatrie
M. BERRY Antoine	Parasitologie
M. BONNEVILLE Fabrice	Radiologie
M. BOUNES Vincent	Médecine d'urgence
Mme BOURNET Barbara	Gastro-entérologie
M. CHAUFOUR Xavier	Chirurgie Vasculaire
M. CHAYNES Patrick	Anatomie
Mme DALENC Florence	Cancérologie
M. DECRAMER Stéphane	Pédiatrie
M. DELOBEL Pierre	Maladies Infectieuses
M. FRANCHITTO Nicolas	Addictologie
M. GARRIDO-STÓWHAS Ignacio	Chirurgie Plastique
Mme GOMEZ-BROUCHET Anne-Muriel	Anatomie Pathologique
M. HUYGHE Eric	Urologie
Mme LAPRIE Anne	Radiothérapie
M. MARCHEIX Bertrand	Chirurgie thoracique et cardiovasculaire
M. MAURY Jean-Philippe	Cardiologie
M. MEYER Nicolas	Dermatologie
M. MUSCARI Fabrice	Chirurgie Digestive
M. OTAL Philippe	Radiologie
M. SOLER Vincent	Ophtalmologie
Mme SOTO-MARTIN Maria-Eugénia	Gériatrie et biologie du vieillissement
M. TACK Ivan	Physiologie
M. VERGEZ Sébastien	Oto-rhino-laryngologie
M. YSEBAERT Loic	Hématologie

P.U. Médecine générale

Mme ROUGE-BUGAT Marie-Eve Médecine Générale

M.C.U. - P.H.

M. ABBO Olivier	Chirurgie infantile
M. APOIL Pol Andre	Immunologie
Mme ARNAUD Catherine	Epidémiologie
M. BIETH Eric	Génétique
Mme CASPAR BAUGUIL Sylvie	Nutrition
Mme CASSAING Sophie	Parasitologie
M. CAVAINAC Etienne	Chirurgie orthopédique et traumatologie
M. CONGY Nicolas	Immunologie
Mme COURBON Christine	Pharmacologie
Mme DAMASE Christine	Pharmacologie
Mme de GLISEZENSKY Isabelle	Physiologie
Mme DE MAS Véronique	Hématologie
Mme DELMAS Catherine	Bactériologie Virologie Hygiène
M. DUBOIS Damien	Bactériologie Virologie Hygiène
M. DUPUI Philippe	Physiologie
M. FAGUER Stanislas	Néphrologie
Mme FILLAUX Judith	Parasitologie
M. GANTET Pierre	Biophysique
Mme GENNERO Isabelle	Biochimie
Mme GENOUX Annelise	Biochimie et biologie moléculaire
M. HAMDJ Safouane	Biochimie
Mme HITZEL Anne	Biophysique
M. IRIART Xavier	Parasitologie et mycologie
Mme JONCA Nathalie	Biologie cellulaire
M. KIRZIN Sylvain	Chirurgie générale
Mme LAPEYRE-MESTRE Maryse	Pharmacologie
M. LAURENT Camille	Anatomie Pathologique
M. LHERMUSIER Thibault	Cardiologie
M. LHOMME Sébastien	Bactériologie-virologie
Mme MONTASTIER Emilie	Nutrition
Mme MOREAU Marion	Physiologie
Mme NOGUEIRA M.L.	Biologie Cellulaire
M. PILLARD Fabien	Physiologie
Mme PUISSANT Bénédicte	Immunologie
Mme RAYMOND Stéphanie	Bactériologie Virologie Hygiène
Mme SABOURDY Frédérique	Biochimie
Mme SAUNE Karine	Bactériologie Virologie
M. SILVA SIFONTES Stein	Réanimation
M. TAFANI Jean-André	Biophysique
M. TREINER Emmanuel	Immunologie
Mme TREMOLLIERES Florence	Biologie du développement
Mme VAYSSE Charlotte	Cancérologie
M. VIDAL Fabien	Gynécologie obstétrique

M.C.U. Médecine générale

M. BRILLAC Thierry
Mme DUPOUY Julie

M.C.U. - P.H.

Mme ABRAVANEL Florence	Bactériologie Virologie Hygiène
Mme BASSET Céline	Cytologie et histologie
Mme CAMARE Caroline	Biochimie et biologie moléculaire
M. CMBUS Jean-Pierre	Hématologie
Mme CANTERO Anne-Valérie	Biochimie
Mme CARFAGNA Luana	Pédiatrie
Mme CASSOL Emmanuelle	Biophysique
Mme CAUSSE Elizabeth	Biochimie
M. CHAPUT Benoit	Chirurgie plastique et des brûlés
M. CHASSAING Nicolas	Génétique
M. CLAVEL Cyril	Biologie Cellulaire
Mme COLLIN Laetitia	Cytologie
Mme COLOMBAT Magali	Anatomie et cytologie pathologiques
M. CORRE Jill	Hématologie
M. DE BONNECAZE Guillaume	Anatomie
M. DEDOUIT Fabrice	Médecine Légale
M. DELPLA Pierre-André	Médecine Légale
M. DESPAS Fabien	Pharmacologie
M. EDOUARD Thomas	Pédiatrie
Mme ESQUIROL Yolande	Médecine du travail
Mme EVRARD Solène	Histologie, embryologie et cytologie
Mme GALINIER Anne	Nutrition
Mme GARDETTE Virginie	Epidémiologie
M. GASQ David	Physiologie
Mme GRARE Marion	Bactériologie Virologie Hygiène
Mme GUILBEAU-FRUGIER Céline	Anatomie Pathologique
M. GUILLEMINAULT Laurent	Pneumologie
Mme GUYONNET Sophie	Nutrition
M. HERIN Fabrice	Médecine et santé au travail
Mme INGUENEAU Cécile	Biochimie
M. LAIREZ Olivier	Biophysique et médecine nucléaire
M. LEANDRI Roger	Biologie du dével. et de la reproduction
M. LEPAGE Benoit	Biostatistiques et Informatique médicale
Mme MAUPAS Française	Biochimie
M. MIEUSSET Roger	Biologie du dével. et de la reproduction
Mme NASR Nathalie	Neurologie
Mme PRADDAUDE Française	Physiologie
M. RIMAILHO Jacques	Anatomie et Chirurgie Générale
M. RONGIERES Michel	Anatomie - Chirurgie orthopédique
Mme SOMMET Agnès	Pharmacologie
Mme VALLET Marion	Physiologie
M. VERGEZ François	Hématologie
Mme VEZZOSI Delphine	Endocrinologie

M.C.U. Médecine générale

M. BISMUTH Michel
Mme ESCOURROU Brigitte

Maîtres de Conférences Associés de Médecine Générale

Dr ABITTEBOUL Yves
Dr CHICOULAA Bruno
Dr IRI-DELAHAYE Motoko
Dr FREYENS Anne

Dr BOYER Pierre
Dr ANE Serge
Dr BIREBENT Jordan
Dr LATROUS Leila

REMERCIEMENTS

A Monsieur le Professeur Pierre MESTHÉ

Professeur des universités, Médecine Générale, faculté de Médecine de Toulouse
Vous me faites l'honneur d'accepter la présidence de mon jury de thèse.
Veuillez trouver ici l'expression de ma reconnaissance et de mon profond respect.

A mon directeur de thèse, Monsieur le Docteur Patrick MAVIEL

Médecin Généraliste, maître de stage universitaire, faculté de Médecine de Toulouse
Je t'adresse toute ma gratitude pour la confiance que tu m'as accordée en acceptant d'encadrer ce travail. Je te remercie d'avoir dirigé cette thèse avec beaucoup de patience et de bienveillance.

A Monsieur le Professeur Jean-Christophe POUTRAIN

Professeur des universités, Médecine Générale, faculté de Médecine de Toulouse
Je vous remercie d'avoir accepté de juger mon travail. J'en suis très honorées et je vous exprime ma plus profonde reconnaissance.

A Monsieur le Docteur Fabrice HÉRIN

Maître de conférences des universités-praticien hospitalier, Maladies professionnelles et environnementales, faculté de Médecine de Toulouse
Je suis très sensible à l'honneur que vous me faites en acceptant de juger mon travail doctoral. Que ce soit pour moi l'occasion de vous témoigner ma vive reconnaissance.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toutes les personnes sans qui cette thèse n'aurait pas pu aboutir.

Au département Métrologie des polluants de l'INRS,

Merci à **Monsieur Benoît OURY**, et à **Monsieur Éric PELLETIER**. Je tiens à vous remercier chaleureusement pour l'aide que vous m'avez apportée. Je vous sais gré d'avoir gracieusement mis l'ensemble des moyens techniques au service de ce travail. Vos conseils avisés, votre expérience et le temps que vous m'avez accordé ont grandement contribué à ce travail.

Au laboratoire d'aérologie de l'université Toulouse 3 Paul Sabatier (UMR 5560 CNRS)

Merci à **Madame Catherine LIOUSSE**, à **Monsieur Jean-François LEON**, et à **Madame Hongmei XU**. Ce fut un plaisir de travailler avec vous. Un grand merci pour l'ensemble des moyens techniques déployés et gracieusement mis au service de ce travail. Merci pour votre temps, votre gentillesse et votre professionnalisme.

Au Service Départemental d'Incendie et de Secours de l'Aveyron,

A tout le personnel du Service de Santé et de Secours Médical ainsi que du Département Formation.

Merci au **Colonel Natalie ALAZARD**, au **Capitaine Jean-Luc AUGUSTE**, au **Capitaine Jean-Bernard FERAL**, ainsi qu'à tous les pompiers qui ont participé à l'élaboration de ce travail, qui m'ont réservé un accueil chaleureux, et qui m'ont ouvert une porte sur le monde des pompiers.

A tous les sapeurs-pompiers de France, merci pour votre service et votre engagement.



LABORATOIRE
D'AÉROLOGIE

Service Départemental
d'Incendie et de Secours



Aveyron



Table des matières

INTRODUCTION.....	2
<i>Contexte</i>	<i>2</i>
<i>Problématique particulière des entraînements en caisson de brûlage</i>	<i>3</i>
<i>Objectifs de l'étude et critères d'évaluation.....</i>	<i>5</i>
MATÉRIEL ET MÉTHODE.....	6
<i>Campagne de prélèvements.....</i>	<i>6</i>
<i>Dispositif expérimental.....</i>	<i>7</i>
<i>Éléments de métrologie des aérosols.....</i>	<i>7</i>
<i>Arsenal métrologique.....</i>	<i>9</i>
Gravimétrie et granulométrie des poussières réputées sans effet spécifique.....	9
Aethalométrie et caractérisation chimique de la fraction particulaire.....	9
Gaz et composés volatils.....	9
RÉSULTATS.....	10
<i>Poussières réputées sans effet spécifique.....</i>	<i>10</i>
<i>Gravimétrie.....</i>	<i>10</i>
<i>Granulométrie.....</i>	<i>10</i>
<i>Aethalométrie.....</i>	<i>13</i>
<i>Charge carbonée.....</i>	<i>13</i>
<i>Analyse MEB.....</i>	<i>15</i>
<i>Spéciation.....</i>	<i>15</i>
<i>Gaz.....</i>	<i>15</i>
<i>Monoxyde de carbone.....</i>	<i>15</i>
<i>Dioxyde de carbone.....</i>	<i>15</i>
<i>Composés organiques volatils.....</i>	<i>16</i>
<i>Aldéhydes.....</i>	<i>17</i>
DISCUSSION.....	18
<i>Réglementation en matière d'exposition.....</i>	<i>18</i>
<i>Comparaison des résultats aux limites d'exposition professionnelles opposables.....</i>	<i>20</i>
<i>Recommandations.....</i>	<i>21</i>
<i>Protections individuelles.....</i>	<i>21</i>
Protections respiratoires.....	21
Vêtements de protection.....	22
<i>Mesures de précaution durant la procédure de nettoyage.....</i>	<i>23</i>
Aération/ventilation du caisson.....	23
Combustible.....	24
Procédés d'humidification.....	24
<i>Spécificités de la surveillance médicale du personnel exposé.....</i>	<i>25</i>
<i>Extrapolation des résultats au déblai en opération.....</i>	<i>28</i>
<i>Limites de l'étude.....</i>	<i>28</i>
<i>Forces de l'étude.....</i>	<i>30</i>
<i>Synthèse des recommandations.....</i>	<i>31</i>
CONCLUSION.....	32
BIBLIOGRAPHIE.....	33
GLOSSAIRE.....	36
ANNEXE I – Figures et tableaux.....	37
ANNEXE II – Notices techniques.....	45
ANNEXE III – Illustrations des installations et des manœuvres.....	46

INTRODUCTION

Contexte

Les données de la littérature s'accumulent depuis de nombreuses années concernant le risque sanitaire lié à l'exposition aux polluants atmosphériques (1). Cet impact est prégnant pour certaines catégories professionnelles en raison de conditions de travail particulières, c'est le cas des sapeurs-pompiers.

Les quelques 250 000 sapeurs-pompiers français, hommes et femmes, constituent un corps d'excellence au service de la sécurité publique. La nature de leur activité les expose à de nombreux risques de différentes natures : accidents, stress psychologique intense et chronique, travail posté de nuit. Leur mission de lutte contre l'incendie en fait une population particulièrement exposée au risque chimique par inhalation des fumées et produits de combustion.

Il est établi que l'exposition à la suie au delà d'une certaine valeur est associée à une élévation significative de la prévalence de symptômes respiratoires, ainsi qu'à des troubles obstructifs et restrictifs irréversibles de la fonction pulmonaire (2). Les études les plus récentes n'ont pas retrouvé l'accélération du déclin de la fonction respiratoire observée chez les pompiers dans les études plus anciennes, probablement en rapport avec une plus grande assiduité du port des appareils de protection respiratoire (3).

L'impact sanitaire sur le plan carcinologique de l'activité de sapeur-pompier fait l'objet d'une documentation épidémiologique dont on peut retenir plusieurs éléments. Les cancers dont l'association avec l'activité de pompier est la plus étayée sont le mélanome et le cancer de la prostate (4), (5), (6). Il existe de nombreuses pathologies néoplasiques pour lesquelles un risque relatif est suspecté, dont des cancers hématologiques (leucémies lymphoïdes et myéloïdes chroniques, lymphome non-hodgkinien, myélome multiple), mais aussi l'adénocarcinome du poumon, le mésothéliome, les cancers du rein et du cerveau (7). L'exposition professionnelle du pompier est classée depuis 2010 par le centre de recherche international sur le cancer dans le groupe 2A, soit possiblement cancérogène pour l'homme (8) et depuis avril 2016, la commission de la santé et de la sécurité au travail du Canada reconnaît sous certaines conditions sept cancers comme maladies professionnelles (9).

Globalement, le sur-risque toutes causes confondues n'est guère supérieur à la population générale, mais la sous-mortalité globale des jeunes pompiers liée à la sélection stringente lors de l'embauche s'efface pour les catégories d'âge supérieur (10).

Problématique particulière des entraînements en caisson de brûlage

Le caisson d'observation et d'entraînement aux phénomènes thermiques (COEPT) est un outil pédagogique de formation et d'entraînement utilisé au sein des services départementaux d'incendie et de secours (SDIS). L'exploitation de ce dispositif se développe depuis 1986 en France dans le cadre de la formation initiale et continue afin d'améliorer la lecture du feu et pour se confronter à des situations réalistes en terme d'intervention et de lutte contre le feu en milieu confiné. L'intérêt de ces outils immersifs consiste à incorporer une dimension de maîtrise en termes d'équipement, de communication et de gestion des paramètres physiques et psychologiques (11), dans des conditions plus proches des conditions réelles.

Si l'exposition au danger chimique est bien documentée sur les lieux de l'incendie et principalement dans le cadre des expositions aux fumées des feux de forêts (12), la question de l'exposition des pompiers aux agents toxiques dans les simulateurs d'incendies est quant à elle encore peu traitée dans la littérature.

Le risque sanitaire lié à l'exposition des formateurs sapeurs-pompiers fait pourtant aujourd'hui l'objet d'une attention particulière de la part de la direction de la sécurité civile (13).

Il existe une grande hétérogénéité des pratiques durant l'ensemble des manœuvres dans le caisson sur l'ensemble des SDIS.

Le type même, et la configuration des caissons varient selon les centres de formation. Des objectifs pédagogiques parfois différents ont fait s'équiper les unités de formations avec des COEPT dans lesquels les participants évoluent à proximité d'une combustion contrôlée, ou avec des caissons d'attaque, à proximité immédiate desquels les intervenants pratiquent les techniques de progression et de lutte contre l'incendie. Il existe des caissons spécifiquement conçus pour l'observation de phénomènes thermiques particuliers, comme l'embrasement généralisé éclair (*flash-over*) ou l'explosion de fumées (*backdraft*). Certaines installations de simulation combinent plusieurs espaces de propagation de la fumée variablement agencés, afin de rendre compte d'une dynamique de progression plus réaliste.

La gestion des produits de la combustion fait l'objet de prises en charge également diverses. Certains centres procèdent à un balayage manuel, immédiatement ou à distance du brûlage, suivi ou non d'une moto-ventilation, tandis que d'autres laissent les déchets sur place, avec une dispersion partielle par le vent, voire avec un apport d'eau pour solvater les cendres.

La diversité des pratiques concerne aussi le choix du combustible. Certains dispositifs utilisent une combustion à gaz avec une fumée simulée par aérosolisation de glycols. La combustion classique est réalisée avec différents combustibles en fonction des centres : carton, palettes, chutes de bois, bois agglomérés variablement adjuvantés, voire des matériaux plastiques tels que des mousses expansées, susceptibles de fournir lors d'une combustion de nombreuses possibilités d'exposition pour le pompier, dues à la multiplicité des substances chimiques émises : gaz irritants (NO_2 et SO_2), gaz toxiques (cyanure d'hydrogène, monoxyde de carbone) et aérosols solides de toutes granulométries, dont la fraction carbonée est vectrice de substances organiques (par adsorption d'hydrocarbures aromatiques polycycliques, aldéhydes et apparentés au furane) potentiellement dangereuses.

En ce sens, et tandis que la part synthétique dans le mobilier intérieur va croissante, l'exposition à un tel panel de substances pourrait constituer une base extrapolable et comparable de la variabilité des produits de combustion à l'issue des feux domestiques en opération réelle (14). Cette exposition est difficilement accessible aux évaluations d'impact, du fait de la fragilité et de l'interférence possible des équipements métrologiques.

Lors de l'entraînement en caisson, les sapeurs-pompiers portent un appareil respiratoire isolant individuel en circuit ouvert (ou ARI). L'exposition par voie inhalée est alors associée, sous réserve d'un port correct de l'équipement, à un risque théorique nul.

La présente évaluation porte sur la phase suivante : l'opération de déblayage par un binôme de formateurs pompiers des résidus des différents combustibles qui ont alimenté le foyer. Ces intervenants allègent au décours de l'opération de déblayage des plaintes fonctionnelles diverses : suies intra-narinales, expectorations noirâtres, toux.

Nous avons choisi d'étudier l'exposition chimique par voie respiratoire dans les suites de cet exercice particulier.

L'impact sanitaire spécifique de cette activité a été étudié sous plusieurs aspects. L'exposition aux hydrocarbures polycycliques est aujourd'hui documentée, principalement par la voie cutanée (15) mais aussi toutes voies confondues, avec des données de plus en plus nombreuses en termes de suivi biologique (16).

La voie respiratoire, qui est le mode d'exposition le plus encadré au niveau réglementaire, n'a pas fait l'objet d'évaluation robuste. Cette étude est intégrée dans la démarche d'évaluation des risques professionnels et s'inscrit dans les neuf principes généraux de la prévention cités aux articles L4121-2 et L4121-3 du code du travail.

Objectifs de l'étude et critères d'évaluation

L'objectif principal de l'étude est d'évaluer l'exposition des sapeurs-pompiers au danger chimique par inhalation lors des entraînements en caisson de brûlage. Les objectifs secondaires sont :

- Établir une liste de recommandations pouvant servir à enrichir une fiche pratique ou un référentiel métier, afin de contribuer concrètement au développement des démarches de prévention du risque chimique.
- Fournir des éléments de comparaison avec l'activité de déblai des sapeurs-pompiers
- Fournir des éléments pour un suivi médical spécifique des formateurs.

Le critère d'évaluation principal de l'étude porte sur la concentration et la granulométrie de l'aérosol auquel sont exposés les intervenants à l'issue de la session de brûlage. Il s'agit d'un critère simple, spécifique, mesurable et accessible, qui permet une comparaison aux normes sanitaires en vigueur.

Les critères secondaires portent sur la nature chimique de cet aérosol, ainsi que sur la caractérisation des gaz et substances chimiques volatiles susceptibles de constituer un danger chimique pour ces intervenants.

MATÉRIEL ET MÉTHODE

La démarche expérimentale a été élaborée en concertation avec le laboratoire d'aérodologie de l'université Toulouse 3 - Paul Sabatier (UMR 5560 CNRS), le département Métrologie des polluants de l'INRS, le Service de Santé et de Secours Médical et le département de formation du SDIS de l'Aveyron.

Campagne de prélèvements

La campagne de prélèvements s'est déroulée durant trois jours consécutifs les 5, 6 et 7 avril 2016 au SDIS de Rodez. Les mesures ont été réalisées durant les opérations de déblayage du caisson à la suite d'une séance de brûlage. Le protocole de mesures a été élaboré pour interférer le moins possible avec les intervenants pompiers, afin d'obtenir une quantification réaliste et représentative des émissions polluantes lors des opérations dans le caisson.

Le caisson d'observation des phénomènes thermiques (COEPT) du SDIS de l'Aveyron est un conteneur de transport de marchandises 40' *Dry Idéal stock* installé en décembre 2012 et dont les dimensions sont : 12,19m de long, 2,44m de large et 2,59m de hauteur, pour un volume de 77 m³. La partie accueillant le foyer a été pavée de briques réfractaires, des ouvertures latérales ainsi qu'un évent ont été aménagés.

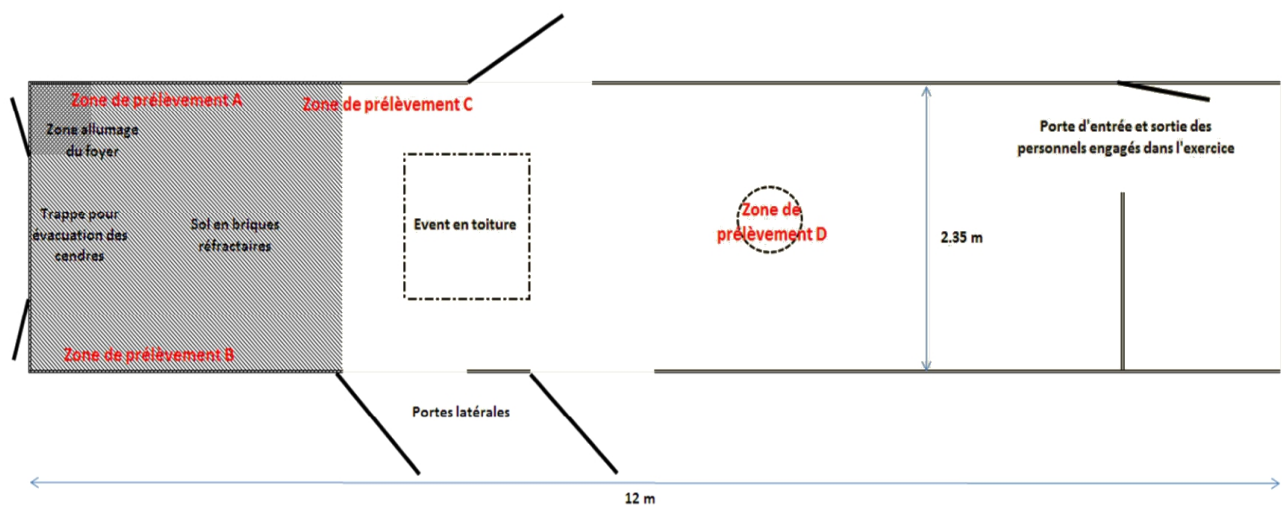


Fig. 1 : Schéma du COEPT du SDIS de Rodez

L'opération dure environ 20 minutes. Elle comprend trois phases successives :

- Le déblai [5 minutes] : Un binôme de pompiers formateurs nettoie l'ensemble des zones A, B, C et D avec des balais. Ils évacuent les débris de combustion les plus grossiers à l'aide de balais, de pelles et d'une brouette afin d'évacuer les résidus hors de l'enceinte de brûlage.

- La phase de moto-ventilation [2 minutes] : Les débris les plus fins et les plus légers sont soufflés à l'aide d'un motoventilateur thermique depuis l'intérieur du caisson.
- L'installation du dispositif de brûlage [entre 10 et 15 minutes] : mise en place des panneaux de bois aggloméré sur les parois et au plafond de la zone A.

Durant l'ensemble des opérations post-combustion, l'intégralité des ouvertures aménagées dans le conteneur, portes et exutoires, sont ouverts. La protection individuelle portée durant ces étapes est l'équipement de protection individuel standard, avec un masque FFP2. Les conditions environnementales sont relativement stables durant les trois jours de la campagne de prélèvements. Le relevé météorologique figure au tableau 1 en annexe.

Dispositif expérimental

Éléments de métrologie des aérosols

La proportion de matière particulaire inhalée, le lieu de dépôt et la probabilité d'expiration dépendent de nombreux paramètres : diamètre des particules, vitesse des particules, fréquence respiratoire et mode de respiration (nasal/buccal). Le diamètre aérodynamique¹ de la particule apparaît comme le critère déterminant du taux de pénétration dans le tractus respiratoire et du lieu de dépôt. Les particules d'un diamètre supérieur à 10µm sont filtrées par le système pileaire vestibulaire puis par l'épithélium alvéolaire des cornets nasaux. Les particules intermédiaires, d'un diamètre de 3 à 10µm, se déposent à la surface des voies aériennes supérieures et sont éliminées soit par le transport muco-ciliaire, soit par expectoration. Enfin les particules les plus fines, d'un diamètre inférieur à 3µm, atteignent la toute distalité de l'arbre bronchique et sont susceptibles de passer dans la circulation systémique via l'interface alvéolaire.

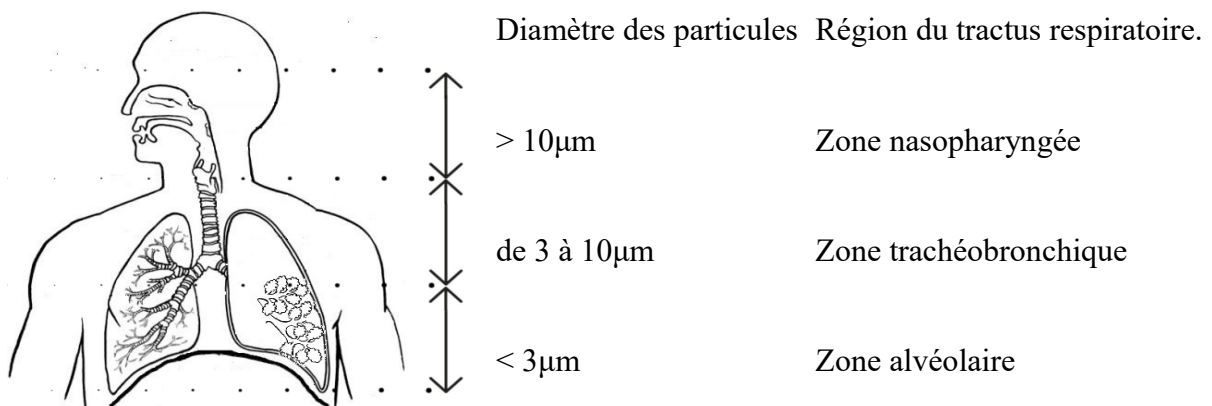


Fig. 2 : Pénétration du tractus respiratoire par les particules en fonction de leur diamètre. (17)

¹ Le diamètre aérodynamique correspond au diamètre d'une sphère ayant la même vitesse limite de chute que la particule et une masse volumique de 1 000 kg.m⁻³.

Dans le cadre de l'exposition au travail, on peut approximer la fraction de particules pénétrant dans les différentes régions de l'appareil respiratoire à travers différentes conventions, établies en fonction du diamètre de ces particules. Les spécifications de ces conventions sont détaillées dans la norme EN481 (18).

La fraction inhalable des particules correspond à l'ensemble des particules de diamètre inférieur à 100µm, susceptibles d'être inhalées et de se déposer tout au long du tractus respiratoire. Par convention, l'échantillonnage de cette fraction d'un aérosol doit recueillir un pourcentage E de particules en suspension dans l'air, en fonction du diamètre D de ces particules, selon la relation :

$$E = 0.5 \times [1 + \exp(-0.06 \times D)]$$

La fraction alvéolaire est la sous-fraction des plus fines particules inhalables, susceptibles de se déposer en distalité de l'arbre bronchique et dont la convention est définie par une loi de distribution log-normale cumulée dont la médiane est de 11.64µm et l'écart-type géométrique de 1.5.

La figure n°3 montre une représentation graphique de ces deux conventions d'échantillonnage.

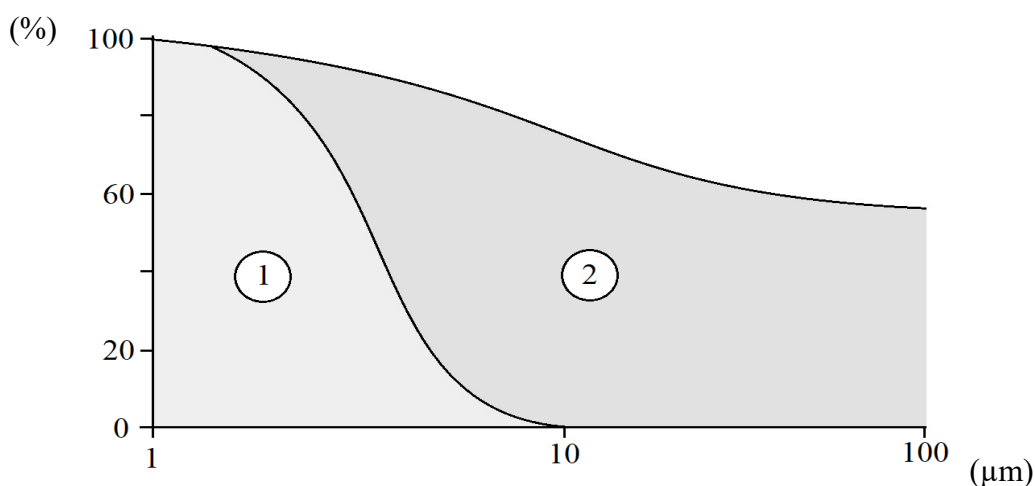


Fig. 3 : Proportion recueillie (%) des particules totales en fonction du diamètre aérodynamique (µm). Les fractions conventionnelles sont représentées par les zones que délimitent les courbes.

①: Alvéolaire, ①+ ②: Inhalable.

Arsenal métrologique

Gravimétrie et granulométrie des poussières réputées sans effet spécifique

Pour l'étude de la fraction particulaire de l'aérosol, le dispositif expérimental était constitué d'un large panel de dispositifs d'échantillonnage, fixes ou individuels destinés à la mesure gravimétrique des différentes fractions de diamètre de l'aérosol :

- Cassette fermée
- Porte-filtre 90 mm
- Cyclone GK 2,69
- Cyclone GK 4,162
- PEM IP10-A / Échantillonneur SKC
- Dorr-Oliver
- Simpeds
- CIP-10

Deux compteurs optiques de particules ont permis la mesure instantanée et en continu de la concentration et de la granulométrie des poussières :

- Compteur de poussières GRIMM
- Light Optical Aerosol Counter (LOAC)

Aethalométrie et caractérisation chimique de la fraction particulaire

Une mesure en continu des particules de suie a été effectuée grâce à un micro-aethalomètre portable.

Une analyse par microscopie électronique à balayage a été effectuée sur un prélèvement de la fraction totale de l'aérosol.

Une spéciation des particules a pu être réalisée par le compteur optique LOAC.

Des mesures de la fraction carbonée de l'aérosol ont été conduites avec :

- Le Sunset Lab OC/CE carbon analyser
- L'analyseur thermo-optique modèle 2001 développé par le DRI

Gaz et composés volatils

Les opérations de déblai prennent place soit immédiatement après, soit à distance de l'exercice. Les déblais en phase chaude exposent à un danger chimique particulier alors que la phase gazeuse renferme davantage de substances toxiques. Des techniques d'échantillonnage gazeux ont donc été déployées.

La mesure en continu des concentrations de monoxyde de carbone et de dioxyde de carbone a été effectuée par un instrument de mesure dédié au contrôle de la qualité de l'air intérieur, le Q-TRAK 7575.

Une identification et une évaluation semi-quantitative des composés organiques volatils présents a été pratiquée par screening : échantillonnage atmosphérique, désorption thermique, séparation chromatographique et détection au spectromètre de masse.

Une mesure des concentrations d'aldéhydes a été effectuée par chromatographie liquide et détection UV après désorption au solvant des supports collectés.

RÉSULTATS

Poussières réputées sans effet spécifique

Gravimétrie

La réglementation impose à l'employeur de respecter une limitation de la concentration moyenne en poussières totales et alvéolaires de l'atmosphère inhalée par un travailleur, respectivement 10 et 5 milligrammes par mètre cube d'air, évaluée sur une période de huit heures (19). Les tableaux 2 et 3 en annexe montrent les concentrations massiques mesurées par analyse gravimétrique. Les prélèvements ont été effectués à la fois individuellement et sur point fixe, en mesure « d'ambiance ». Les différentes techniques d'échantillonnage sont présentées en annexe, avec les liens vers leurs notices techniques.

La fraction alvéolaire qui est une sous-partie de la fraction totale est, comme attendu, présente en plus faible concentration. La concentration maximale mesurée en fraction inhalable par prélèvement individuel dépasse les 20 mg.m⁻³.

La plupart des échantillons prélevés au jour 2 montrent des concentrations plus importantes par rapport aux autres opérations, la fraction totale est par exemple de 153% de celle du jour 3, (tableau 3), une explication est proposée infra.

Granulométrie

La concentration et le diamètre des particules ont fait l'objet de mesures résolues temporellement durant les différentes phases de l'exercice, afin d'identifier les classes granulométriques les plus émises. Nous pouvons ainsi dresser un profil granulométrique pour chacune des différentes phases. Le compteur de poussières GRIMM permet la mesure instantanée et en continu, par diffraction lumineuse, de la concentration et de la granulométrie sur 15 canaux couvrant une gamme allant de 0,3 µm à plus de 20 µm, avec une résolution temporelle de 6 secondes.

Les figures 4.a, 5.a, 6.a représentent la concentration particulaire en fonction du temps. Nous pouvons y distinguer deux fortes périodes d'aérosolisation, (phases 3 et phases 4), qui correspondent successivement au balayage manuel et à la moto-ventilation. Les phases 5, qui correspondent à l'installation des panneaux de bois pour le prochain exercice, ainsi que l'ensemble des phases 1 et 2, qui précèdent immédiatement la manœuvre de déblai, sont des phases mineures de la mise en suspension de poussières. Nous observons que la mise en suspension des particules est très rapide, avec des maxima atteints quelques minutes à peine après le début de la manœuvre. La diminution de la

concentration des particules, qui se produit par sédimentation, dépôt sur les parois ou évacuation hors du caisson, est presque aussi rapide lors de l'arrêt.

Les figures 4.b, 5.b, 6.b représentent la distribution granulométrique en fonction du diamètre géométrique de la particule. Une décroissance du nombre de particules en fonction de leur taille est observée. Le diamètre des particules n'est pas sensiblement différent entre les phases de balayage manuel (phases 3) et la période de moto-ventilation (phases 4). La concentration maximale mesurée pour la plus fine fraction mesurée (0.30 - 0.40 μm) est de : 519 éléments/ cm^3 , avec des particules totales atteignant 1534 éléments/ cm^3 .

Le choix de la transformation normalisée logarithmique en ordonnée permet de s'affranchir du problème de résolution lié au nombre fini de canaux d'enregistrement pour la mesure du pic de concentration. Cette transformation est licite en postulant que l'aérosol suive une distribution normale, ce qui est empiriquement observé. Cette transformation est obtenue par la formule :

$$dN / d\log D_p = \frac{dN}{d\log D_p} = \frac{dN}{\log D_{p,u} - \log D_{p,j}}$$

avec dN = Concentration en particules

D_p = Diamètre particulaire médian

$D_{p,u}$ = Diamètre supérieur du canal

$D_{p,j}$ = Diamètre inférieur du canal

Les figures 4.c, 5.c et 6.c représentent l'émission de monoxyde de carbone en fonction du temps, sur une échelle synchronisée avec les figures A. Nous reviendrons sur ces émissions (cf. § monoxyde de carbone).

Nous avons également effectué des mesures de granulométrie par le compteur optique LOAC. Les courbes sont superposables pour la plupart des gammes de concentration. Les courbes de comparaison sont disponibles en annexe aux figures 7.a,b. Nous notons une discordance des résultats entre 5.512 et 5.517, avec une diminution paradoxale des concentrations particulières toutes gammes comprises sur le diagramme du LOAC, du fait d'un problème de saturation connu (20), pour les concentrations particulières supérieures à 10 éléments/ cm^3 , qu'illustre la figure 8 en annexe.

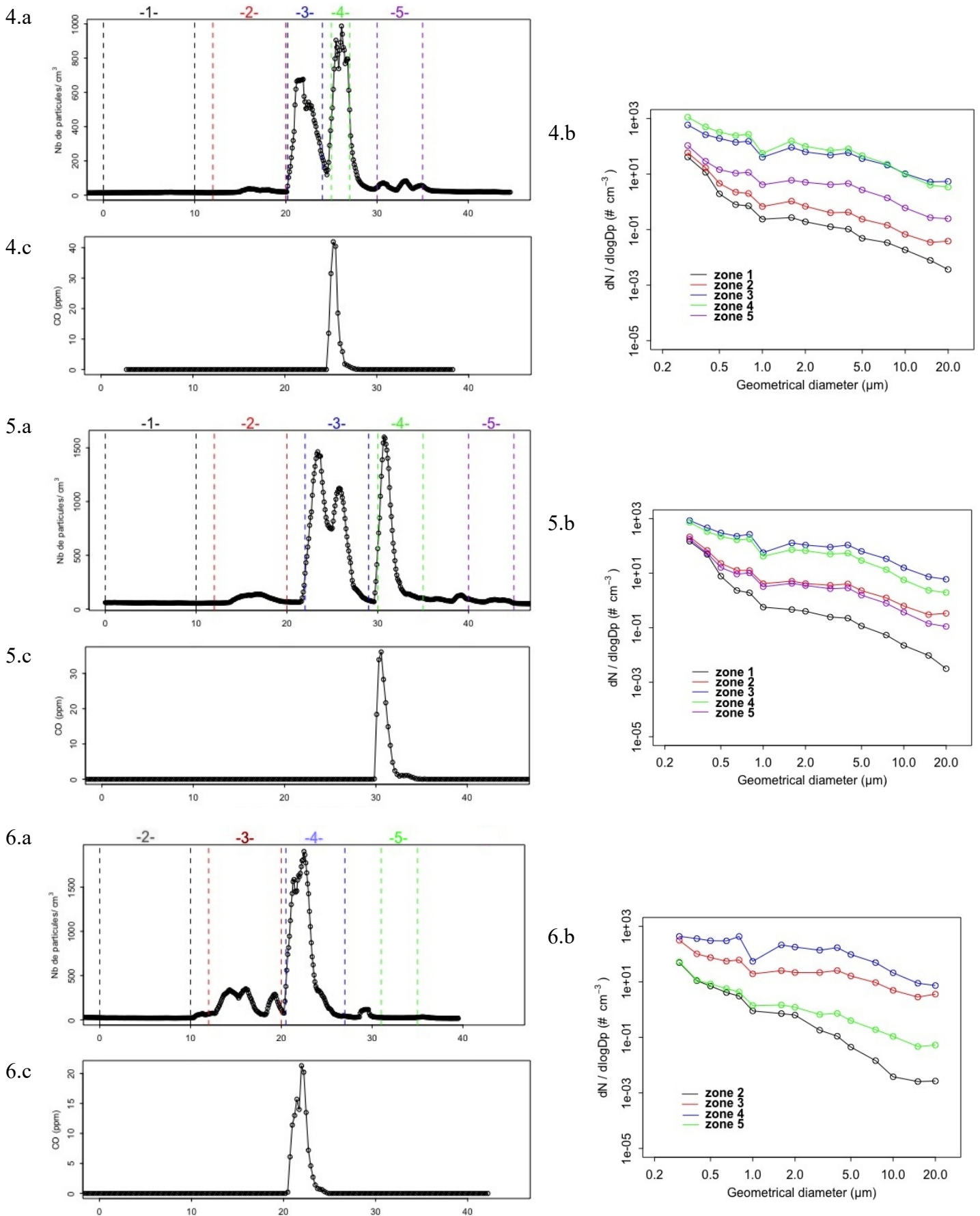


Fig. 4, 5, 6 : figures 4 : jour 1 ; figures 5 : jour 2 ; figures 6 : jour 3.
 figures 4a, 5a, 6a : concentrations de particules en fonction du temps,
 figures 4b, 5b, 6b : profils granulométriques, figures 4c, 5c, 6c : concentrations de CO

Aethalométrie

La mesure en temps réel du carbone suie (ou black carbone), reproduite aux figures 9.a,b,c en annexe, permet de suivre l'évolution de la concentration en suie durant toute la manœuvre. La résolution temporelle permet d'identifier plus précisément les phases à risque sur les trois opérations de déblayage.

On retrouve les trois phases de l'opération à l'intérieur du caisson, facilement individualisables et correspondant à des émissions spécifiques. On peut voir que les phases de balayage manuel et de moto-ventilation sont des phases de forte aérosolisation. Les pics liés au moto-ventilateur sont concomitants avec l'émission de CO (figures 4.c, 5.c, 6.c).

On peut expliquer l'important pic observé pendant le balayage au deuxième jour par une combustion plus complète, ayant pu générer des cendres plus fines, plus facilement mises en suspension, contrairement aux opérations des jours 1 et 3 dans lesquelles l'utilisation de lances incendie pour réguler la température dans le caisson a pu interrompre partiellement la combustion. Le suivi du nombre de particules par GRIMM est concordant, avec des concentrations en particules totales presque deux fois plus élevées que les autres jours (fig. 5.a). Le dépôt des particules dans le caisson durant toute la phase de refroidissement a probablement été prépondérant pour les particules les plus fines (dû au mouvement brownien) et pour les particules les plus grossières (dû à la sédimentation et à l'inertie des particules) (21), réalisant la classique « courbe en V » des courbes de dépôt d'aérosol en fonction de leur diamètre. D'ailleurs, la fraction fine (PM1, tableau 3) et la fraction totale contenant les particules les plus grosses sont nettement plus présentes le deuxième jour, alors que les particules de taille intermédiaire (PM2.5), dont la durée de vie en suspension est plus grande, ont pu être partiellement extraites par la ventilation et ne montrent pas de concentration clairement supérieure.

Charge carbonée

Les composés macro-moléculaires du bois, ligneux, cellulosiques et hémi-cellulosiques produisent par combustion la partie carbonée de l'aérosol. Cette fraction carbonée est mesurée grâce à un analyseur de carbone SUNSET OC/CE carbon analyser, par méthode thermo-optique selon deux protocoles d'analyse utilisés en parallèle, IMPROVE² et EUSAAR 2³, qui figurent parmi les protocoles les plus utilisés actuellement.

Les résultats figurent au tableau 4 en annexe.

Ces méthodes thermo-optiques utilisent à la fois les propriétés de corps noir et le caractère réfractaire du carbone pour distinguer deux fractions carbonées distinctes :

2 IMPROVE : US-interagency Monitoring of Prospected Visual Environments

3 EUSAAR : European Super-sites for Atmospheric Aerosol Research

- Le carbone élémentaire (EC), la fraction « graphitisée » hautement polymérisée avec une structure ordonnée. Il contient très peu d'hétéroatomes (tels que O, H, N), et est chimiquement inerte.
- Le carbone organique (OC) regroupant l'ensemble des composés organiques fonctionnalisés souvent adsorbés en surface des particules de carbone élémentaire.

Il n'existe cependant pas de frontière claire entre ces deux fractions et leur séparation est dite opérationnelle, c'est-à-dire dépendante de la méthode de mesure. Les deux méthodes utilisées durant la campagne de prélèvements tendent par exemple à identifier plus de carbone en tant que carbone élémentaire par rapport à d'autres méthodes (22).

Le ratio entre ces deux fractions (OC/CE) est un indicateur classique et préconisé de la qualité de l'air (23) qui contribue à définir l'origine de l'aérosol et peut servir de donnée aux modèles de simulation de chimie-transport tels que CHIMERE.

Les masses de carbone et les ratios OC/EC, rapportés dans les tableaux 5 et 6 en annexe, ont été mesurés par méthode thermo-optique, par l'analyseur thermo-optique modèle 2001 développé par le DRI (Desert Research Institute de Reno, Nevada), selon la méthode IMPROVE au sein du laboratoire d'aérodologie.

Les rapports OC/CE ne sont pas disponibles pour la fraction PM₁ du premier jour ni pour la fraction PM_{2.5} le troisième jour. Cela s'explique par une trop faible proportion de carbone total recueilli.

Nous notons une certaine variabilité de ces rapports dans les prélèvements individuels (d'un facteur 1 à 10). Pour les deux pompiers, les concentrations évoluent de la même manière. Nous pouvons donc écarter l'origine artefactuelle de cette variabilité. De même, la nature ainsi que la masse du carburant sont similaires pour les trois opérations.

De plus, on observe sur les prélèvements individuels, ou moins sensiblement sur l'échantillonnage d'ambiance, une baisse du ratio OC/CE lorsque le déblai se fait à distance du brûlage. Cela pourrait signifier une contribution plus importante des sources d'aérosols primaires (24), (25).

Le niveau relativement bas de la fraction organique est difficilement explicable. Un éclairage sur l'hygroscopicité de l'aérosol pourrait offrir une clef de compréhension. Deux des importants précurseurs d'aérosols organiques secondaires dans la phase gazeuse issus de la combustion du bois, le syringol et le guaiacol, produisent par oxydation des nitro-méthoxyphénols aux propriétés respectivement hydrophiles et hydrophobes (25). Ainsi, on pourrait expliquer une faible part d'OC, après l'apport d'eau dans le caisson, par

solvatation de la partie hydrophile de la fraction organique.

Une autre explication pourrait tenir aux très hautes températures atteintes dans le caisson, susceptibles de dégrader certains produits organiques lourds contenus dans le bois, formant ainsi du carbone pyrolytique, qui est dosé lors de l'analyse avec le carbone élémentaire.

Analyse MEB

Une analyse par microscopie à balayage électronique de la fraction totale de l'aérosol, recueillie sur filtre nucléopore, a été menée. Quelques clichés sont reproduits en annexe aux figures 10.a,b,c. Nous mettons en évidence des suies avec formation de sphérules de carbone (10.a), avec des formations colloïdales typiques du carbone élémentaire (ou noir de carbone), ainsi que des cendres (10.b,c) contenant de la silice, du calcium et des oxydes métalliques.

Spéciation

Le LOAC, en se basant sur les caractéristiques de réfraction et d'absorbance de certaines familles de composés chimiques permet de déterminer la nature de certains composants présents dans l'aérosol. Le diagramme de spéciation, reproduit en annexe à la figure 11, montre une composition différente pour les différentes fractions de l'aérosol. La majorité de la fraction fine est composée de carbone alors que la fraction grossière contient plutôt les poussières minérales.

Gaz

Monoxyde de carbone

La concentration de CO est suivie par méthode électro-chimique grâce à l'appareil de mesure en temps réel Q-Trak. Les figures 4c, 5c, 6c, (cf. supra) reproduisent cette concentration en fonction du temps. La phase de moto-ventilation est concomitante d'une émission de CO, avec un pic atteignant : 41.9 ppm le 05/04/16. La seule source possible de combustion incomplète est le moteur thermique du moto-ventilateur.

Dioxyde de carbone

La concentration de CO₂ est suivie par méthode électro-chimique grâce à l'appareil de mesure en temps réel Q-Trak. Le maximum mesuré est de 682 ppm, avec des chiffres évoluant entre 400 et 500 ppm la majorité du temps. Les valeurs sont comparables à la fraction molaire de l'air sec, soit 403,3 ppm en 2016. Ce sont des valeurs auxquelles nous

pouvions nous attendre à distance de l'exercice, compte-tenu des nombreuses et larges ouvertures assurant une ventilation importante de la structure d'entraînement.

Composés organiques volatils

Trois prélèvements de type screening ont été réalisés pour l'identification des COV lors des phases de déblayage sur une durée cumulée de 58 minutes, aux points de prélèvements A,B et C.

L'échantillonnage atmosphérique se fait au travers d'un tube renfermant trois plages successives d'adsorbants. Les polluants susceptibles d'être présents dans l'atmosphère sont désorbés thermiquement, séparés par chromatographie en phase gazeuse, puis détectés par spectrométrie de masse. Le chromatogramme établi lors du déblai est reproduit en annexe à la figure 12.

Cette méthode permet une identification semi-quantitative des polluants volatils présents dans le caisson durant la phase de déblai, avec une sensibilité de l'ordre de 10 ppb.

La plupart des substances retrouvées sont essentiellement des hydrocarbures. Les polluants majeurs sont le xylène, l'éthylbenzène, le triméthylbenzène et l'hexane. Quelques hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont identifiés à l'état de traces : naphtalène et anthracène.

En intégrant l'ensemble des pics constituant le chromatogramme (hors air, oxydes d'azote, de carbone et de soufre qui ne sont pas des COV) et en supposant totale la rétention de ces polluants lors du prélèvement et leur facteur de réponse en spectrométrie de masse équivalent aux étalons internes (benzène perdeutérié et éthylbenzène perdeutérié), la concentration totale en COV détectés est estimée inférieure à 2 mg.m⁻³.

Le deuxième jour de la campagne, deux pompes ont été placées dans le caisson dans la zone D durant l'opération de brûlage. Le chromatogramme établi lors du brûlage est reproduit en annexe à la figure 13. Les substances présentes en plus grandes quantités sont le benzène, le naphtalène, le toluène, le styrène et le phénol. En totalité, plus d'une cinquantaine de COV sont identifiés à des niveaux de concentration non négligeables, à savoir pour les principaux :

- Des hydrocarbures aromatiques : le benzène, à un niveau de concentration compris entre 2 et 8 mg.m⁻³, le toluène entre 0,5 et 3 mg.m⁻³ et le styrène entre 0,25 et 1,5 mg.m⁻³.
- Des HAP : le naphtalène entre 1,5 et 5 mg.m⁻³, acénaphthylène et anthracène entre 0,25 et 1,5 mg.m⁻³,
- Du phénol entre 0,25 et 1,5 mg.m⁻³
- Des composés azotés : amines, nitriles à des concentrations inférieures au mg.m⁻³.

Du fait de la température de l'air prélevé, supérieure à 40°C et du faible volume échantillonné, (0.75 litre), la détermination des produits les plus légers et la semi-quantification des espèces présentes peuvent être entachées d'une incertitude élevée. Nous pouvons néanmoins estimer la concentration totale en COV détectés en intégrant l'ensemble des pics du chromatogramme à un niveau compris entre 20 et 50 mg.m⁻³.

Aldéhydes

Les prélèvements d'aldéhydes ont été effectués sur des supports de collecte de silice imprégnée de 2,4-DNPH. Les concentrations sont mesurées par chromatographie liquide et détection UV. Les résultats du prélèvement durant l'opération de balayage sont retranscrits au tableau 7. Seul le formaldéhyde a pu être identifié.

Les résultats du prélèvement durant l'opération de brûlage sont retranscrits au tableau 8. Les concentrations de formaldéhyde sont retrouvées à des niveaux de concentration plus importants, environ cent fois plus concentrés (1,49 mg.m⁻³) que pendant la phase de déblai. Malgré une volatilité moindre⁴ nous retrouvons la présence d'acétaldéhyde (2.25mg.m⁻³), absente lors de la phase de déblai.

4 Pression de vapeur saturante à 20°C de l'acétaldéhyde : 101 kPa, du formaldéhyde : 440 kPa.

DISCUSSION

Réglementation en matière d'exposition

La valeur limite d'exposition professionnelle (ou VLEP) d'un composé chimique représente « *la concentration dans l'air que peut respirer une personne durant un laps de temps déterminé, telle que l'exposition à cet agent dangereux en deçà de cette concentration n'entraîne pas, même pour une exposition répétée tout au long d'une vie professionnelle, de risque sanitaire théorique* » (32).

Ces outils pour la prévention du risque chimique sont fixés par voie réglementaire et inscrites au code du travail. Il appartient à l'employeur de pratiquer, ou de faire pratiquer les mesures de contrôle du niveau d'exposition afin d'adapter les mesures de protection et de prévention idoines, conformément à l'article L4121-1 du livre premier du code du travail. La responsabilité de l'employeur est rappelée par décret (33).

Le tableau 9 résume les valeurs limites réglementaires fixées pour les substances dosées en possédant une.

Tab. 9 : Valeurs limites d'exposition réglementaires des substances étudiées

Substance	N° CAS	VLEP-8 h (mg.m ⁻³)	VLCT-15 min mg.m ⁻³
Poussières réputées sans effet spécifique	-	Inhalable : 10 Alvéolaire : 5	-
Formaldéhyde	50-00-0	0,61	1,22
Acétaldéhyde	75-07-0	180	-
Monoxyde de carbone	630-08-0	55	-
Dioxyde de carbone	124-38-9	9000	-
Benzène	71-43-2	3,25	-
Toluène	108-88-3	78,6	384
Phénol	108-95-2	7,8	15,6
Styrène	100-42-5	215	-
Naphtalène	91-20-3	50	-

On rappellera que le respect des valeurs limites n'implique pas pour autant l'absence de risque. Ainsi, les VLEP doivent être considérées comme des objectifs minimaux de prévention. En effet, de nombreuses difficultés techniques se posent toujours à la fixation de ces valeurs limites, notamment liées aux autres modes d'exposition (cutané, digestif), aux effets d'efforts physiques pouvant accroître la pénétration des polluants dans l'organisme, aux marges d'erreurs métrologiques, aux interactions et potentialisations possibles de différentes substances entre elles, à l'extrapolation difficile à partir de modèles

animaux... Les valeurs limites répondent donc à la fois à un état des connaissances scientifiques en perpétuelle évolution et à un consensus politique et social sur ce qu'il paraît « acceptable » d'admettre en terme d'exposition. Cette précaution est tout particulièrement à prendre en compte pour les substances cancérigènes, mutagènes et reprotoxiques (appelées CMR), comme le benzène par exemple, leucémogène avéré, pour lequel une dose-seuil d'innocuité n'a jamais pu être établie.

Il existe plusieurs modalités de valeurs limites d'exposition :

- Les **valeurs limites contraignantes** s'imposent à l'employeur. Leur non-respect expose à des sanctions. Elles sont fixées par décret en Conseil d'État et intégrées au code du travail (article R. 4412-149). Ces substances soumises à des valeurs d'exposition contraignantes sont indiquées en caractères gras dans le tableau n°9.
- Les **valeurs limites indicatives** prévues au III de l'article R. 232-5-5 du code du travail, sont fixées par arrêté (arrêté du 30 juin 2004 modifié (34)) et constituent des objectifs de prévention, sans qu'elles soient l'objet d'une obligation réglementaire.
- Les **valeurs limites d'exposition sur 8 heures** (ou VLEP) sont mesurées sur une durée de travail de 8 heures. Elles sont destinées à protéger les salariés des effets différés des polluants.
- Les **valeurs limites de court terme** (ou VLCT) sont des valeurs mesurées sur une période de référence de 15 minutes. Elles sont destinées à éviter les effets toxiques dus à des pics d'exposition.

Notons que la valeur d'exposition de court terme limite la dose cumulée du polluant durant la période de 15 minutes mais ne prescrit pas de limitation en terme de pic d'exposition, comme l'illustre la figure 14 en annexe. Il n'existe actuellement pas en France de valeur plafond. Plusieurs auteurs ont préconisé une limite de 4 à 6 pics d'exposition de court terme par journée de travail, avec des durées de l'ordre de l'heure entre deux pics successifs, sans que cette approche ne soit actuellement retenue en France ni ne fasse l'objet d'une prescription réglementaire.

Les mesures individuelles d'exposition du travailleur sont effectuées dans la zone respiratoire⁵. Il est à noter que la description de la zone respiratoire est inapplicable lorsqu'un équipement de protection est utilisé et que les VLEP ne tiennent pas compte du port de ces équipements.

5 La zone respiratoire est définie comme la zone comprise à l'intérieur d'un hémisphère de 30 cm de rayon s'étendant devant le visage, centrée sur le milieu d'un segment qui joint les deux oreilles et dont la base est le plan passant par ce segment, le sommet de la tête et le larynx. (EN1540)

Comparaison des résultats aux limites d'exposition professionnelles opposables

La fraction alvéolaire de l'aérosol ne dépasse pas une concentration de $0,5 \text{ mg.m}^{-3}$ sur l'ensemble des prélèvements effectués, soit un dixième de la VLEP pondérée sur 8h. La fraction inhalable atteint jusqu'à 20 mg.m^{-3} sur la quinzaine de minutes que dure l'opération. Il n'existe pas de valeur d'exposition limite de court terme pour cette fraction et la comparaison à la VLEP de 10 mg.m^{-3} doit tenir compte de l'ensemble du reste des expositions sur la journée de travail du formateur pompier.

La concentration de carbone élémentaire ne fait actuellement pas l'objet d'une VLEP en France. La valeur d'exposition limite allemande (Arbeitsplatzgrenzwert) est fixée à $50 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ dans la fraction alvéolaire. Mais cette valeur limite est fixée dans le cadre particulier de l'exposition aux fumées de moteur diesel et est pondérée pour une durée de travail de 5 journées de 8 heures, si bien qu'il est difficile de faire une comparaison avec l'exposition en caisson de brûlage.

Les pics étroits d'émission de monoxyde de carbone, avec le maximum retrouvé de 41.9 ppm, restent inférieurs à la VLEP de 50 ppm sur 8 heures et très inférieurs à la valeur plafond de 200 ppm recommandée par les expertises en vue de la fixation de valeurs limites à des agents chimiques en milieu professionnel. Néanmoins, la demi-vie biologique d'élimination de carboxy-hémoglobine est très variable, et les modèles d'association entre l'exposition et la concentration systémique (tels que Coburn-Forster-Kane) sont entachés de nombreuses incertitudes liées aux idiosyncrasies physiologiques et environnementales : le risque de bio-accumulation persiste à faibles doses. Le risque d'intoxication aiguë de ce gaz non filtrable, avec des effets sanitaires graves et irréversibles doit être réduit au minimum. Ainsi, il serait intéressant d'envisager des moyens de substitution pour la ventilation du local.

Le maximum de concentration du CO_2 est mesuré à 682 ppm, ce qui est très inférieur à la VLEP fixée à 5000 ppm, même en négligeant les conditions paramétriques de pression et de température non suivies de façon monitorée durant les exercices nécessaires à la conversion d'unité ppm/mg^{-3} ⁶. Des effets cliniques ont été décrits pour un seuil inférieur à la VLEP actuelle, entre 600 ppm et 1,000 ppm de CO_2 . Il s'agit d'effets cognitifs et plus précisément d'une baisse de performance de la prise de décision (35).

⁶ L'équivalence en terme de concentration pour les différentes unités exprimées de la VLEP n'est valable que dans les conditions standard (1 atm, 25 °C).

Le screening des COV mesurés lors du déblai des cendres froides met en évidence plusieurs substances à l'état de traces dont les concentrations sont bien en deçà de leurs VLEP respectives. Durant le brûlage, la concentration en COV est beaucoup plus importante, avec des taux de benzène dépassant probablement la VLEP (mesuré à entre 2 et 8 mg.m⁻³, VLEP à 3.35 mg.m⁻³), même si la comparaison avec des valeurs d'exposition respiratoires limites a peu de sens pour les activités réalisées sous protection respiratoire isolante.

Comme nous pouvions l'anticiper, la concentration atmosphérique en aldéhydes est bien moindre pendant le déblai que lors du brûlage. Il persiste néanmoins des concentrations notables de formaldéhyde, quoique bien en deçà de sa VLEP à distance de la combustion (maximum pour un prélèvement individuel à 0.013 mg.m⁻³, pour une VLEP à 0,61 mg.m⁻³). La concentration de formaldéhyde pendant l'opération de brûlage est mesurée à plus de 120% de sa VLCT (mesure au point fixe à 1.49 mg.m⁻³ pour une VLCT à 1.22 mg.m⁻³). L'acétaldéhyde, dont la concentration atteinte lors du brûlage reste très faible en regard de sa VLEP (concentration mesurée à 2.25 mg.m⁻³, VLEP à 180mg.m⁻³), est indétectable à distance du brûlage. Ces résultats nous font préconiser un intervalle libre à respecter entre le brûlage et le déblayage, dont la durée minimale, difficilement évaluable, sera la plus longue possible. Les déblais doivent si possible être effectués avant la phase de brûlage.

Recommandations

Plusieurs recommandations peuvent être déduites à la fois des résultats de cette étude et des éléments retrouvés dans la littérature sur le sujet.

Protections individuelles

Protections respiratoires

Il existe deux grands types de protection respiratoire : les systèmes filtrants, qui épurent les polluants lors des échanges respiratoires du porteur de l'appareil et les systèmes isolants, qui rendent l'utilisateur indépendant de l'atmosphère environnante par alimentation depuis une source d'air non contaminée.

Les pompiers évoluant dans le caisson portent un système isolant durant l'opération de brûlage et un demi-masque filtrant répondant à la norme FFP2 lors du déblai.

Le niveau de protection des filtres anti-aérosols répond à la norme NF EN 143, qui classe sur 3 grades d'efficacité les appareils en fonction de leur performance de filtration

d'un aérosol type⁷. Les fuites au visage doivent également être prises en compte dans l'efficacité globale de ces appareils. Le facteur de protection assigné (FPA) d'un appareil filtrant correspond à un niveau de protection attendu en situation réelle de travail.

Le choix d'une classe de protection d'un appareil filtrant dépend de la concentration du polluant dans la zone de travail. On peut déduire de la concentration de polluants mesurés le niveau de protection adéquat.

Les demi-masques de classe P1, dits de faible efficacité, ont un taux maximum de fuites totales vers l'intérieur du masque de 22% de l'aérosol (36). Lorsque la concentration de polluants ne dépasse pas 4 fois leur valeur limite d'exposition, le port d'un masque de type FFP1 est indiqué (37).

Néanmoins, nous avons vu que le risque lié à l'inhalation de particules n'est qu'un des aspects de l'exposition totale des pompiers durant la phase de déblai. La présence de substances organiques nocives adsorbées sur les particules carbonées de l'aérosol doit encourager les actions d'équipement par des systèmes d'efficacité supérieure. Rappelons également que le diamètre particulaire pour lequel les systèmes de filtrations classiques sont les moins efficaces se situe aux alentours de 0.3 µm, soit un diamètre pour lequel les profils granulométriques ont montré les plus fortes concentrations.

La présence de gaz et de composés volatils, même en concentrations modestes, doivent en théorie donner lieu à des mesures de filtration spécifiques, par des filtres anti-gaz, de type ABEK par exemple. Le prix élevé de tels systèmes, avec des temps de claquage de l'ordre de quelques heures maximum, doit être pris en compte dans un environnement budgétaire structurellement contraint (38). Enfin, la présence de monoxyde de carbone lors de la moto-ventilation pose un problème particulier : il existe des filtres à monoxyde de carbone mais ils doivent être réservés aux appareils d'évacuation et de survie. Les avantages en terme de protection du port d'un système respiratoire isolant doivent être considérés.

Vêtements de protection

L'effet des vêtements sur l'exposition des formateurs incendie a déjà été décrit dans la littérature. L'utilisation de sous-gants diminue de manière significative l'exposition aux hydrocarbures polycycliques (16). Le type de veste de feu ne semble pas modifier l'absorption cutanée. Le reste de l'équipement standard comprend la cagoule, le casque F1, le bavolet de nuque, le sur-pantalon et les rangiers.

La chaîne d'hygiène des équipements de protection est un élément clef de

⁷ Aérosol composé de particules de NaCl de diamètre médian 0,6µm et d'huile de paraffine de diamètre médian 0,4µm.

l'exposition au danger chimique. La fréquence et les modalités de lavage des tenues de feu, des ARI, l'intérêt d'une ventilation des tenues de feu et du brossage, ainsi que l'ensemble des pratiques d'hygiène doivent être évalués et donner lieu à des moyens à la fois architecturaux, organisationnels, techniques et humains.

Mesures de précaution durant la procédure de nettoyage

Aération/ventilation du caisson

Les relevés montrent une persistance de COV et d'HAP dans le caisson de combustion plusieurs heures après la fin des opérations, à une concentration très faible. La cinétique de diminution de la concentration d'un aérosol dans un local est de type exponentiel (21). Plus on se rapproche de l'opération de combustion, plus la phase gazeuse est riche en éléments chimiques difficilement filtrables par les masques de protection classiques. Ainsi, afin de limiter l'exposition chimique des formateurs, il serait préférable de nettoyer le caisson après un intervalle libre qui reste à déterminer. Le plus long possible, de plusieurs heures au moins, avant l'exercice préférentiellement. Plusieurs centres de formation ont déjà fait le choix de nettoyer le caisson « à froid ». La surveillance de la température résiduelle du foyer pourrait peut-être servir d'indicateur. Une corrélation resterait à confirmer par des mesures conjointes chimiques et thermiques.

Une autre solution avancée est de ne pas procéder au déblai à l'issue de l'opération de brûlage ; certains centres ont fait ce choix. Laisser les cendres telles quelles et laisser le conteneur se ventiler spontanément n'est pas sans être problématique. Les scories les plus lourdes ont tendance à persister dans le caisson ; à terme, l'accumulation peut compromettre la salubrité de la zone d'évolution des intervenants. De plus, l'aethalométrie du jour 2 montre une importante remobilisation de particules après plus de 12h de ventilation spontanée, exutoires ouverts, avec une brise vespérale légère forçant jusqu'à petite brise au matin. Pour pallier ce problème, certains centres ont aménagé un foyer surélevé, avec une trappe permettant d'évacuer les déchets avec un minimum de manipulations et une exposition réduite. La mise en place du combustible reste, avec cet aménagement, toujours une phase à risque.

Nous avons vu que la phase de moto-ventilation génère à la fois un pic d'émission de monoxyde de carbone et une forte concentration particulaire. Cette opération constitue un risque particulier durant le déblai et mérite d'être repensée. Y substituer des systèmes d'aspiration, moins susceptibles de remettre en suspension les particules sédimentées, pourrait être envisagé. A défaut, un soufflage produit depuis l'extérieur, avec un moteur

thermique diminuerait forcément le risque chimique global.

Combustible

Une consultation de la littérature montre que la nature des combustibles utilisés est un facteur déterminant de l'exposition des personnels intervenant dans le caisson (16). Les concentrations de cyanure d'hydrogène semblent être de plus de 80% plus importantes lorsque du polystyrène est brûlé. Le contre-plaqué de conifère émet 95% de plus de cyanure d'hydrogène que les bois non résineux.

L'émission de benzène est de 60% plus élevée lors de la combustion de contre-plaqué que lors de la combustion de bois aggloméré, et de 80% plus élevée que lors de la combustion de bois massif. L'évolution des marqueurs biologiques chez le personnel exposé était concordante. La combustion au propane semble être la moins émettrice de benzène.

Les niveaux de formaldéhyde les plus élevés sont mesurés dans les simulateurs à gaz (probablement à cause de la fumée artificielle par vaporisation de glycols). Le bois brut est le moins émetteur.

Afin de limiter le risque chimique lié à l'émission locale de substances nocives, le choix du combustible se portera par ordre de préférence sur : le gaz, le bois brut non résineux, le bois brut résineux, le bois lamellé-collé voire des panneaux sans urée-formaldéhyde ou thermo-fusionnés, les panneaux de copeaux orientés (OSB), le bois aggloméré, les panneaux de fibres de moyenne densité (MDF ou medium), les panneaux de contreplaqué et panneaux de bois lamifié et contre-collé. Les produits contenant des aminoplastes : résine urée-formaldéhyde ou mélamine-formaldéhyde (Formica) doivent préférentiellement être substitués. On proscrit tout produit plastique (polystyrène, mousse...), pourvoyeur de cyanure d'hydrogène.

En outre, des solutions de diminution de la quantité de combustible ont déjà été avancées (39) et doivent être considérées en tenant compte des objectifs pédagogiques de l'exercice.

Procédés d'humidification

La loi prévoit la mise en œuvre de procédés d'humidification (40). On peut penser à l'abattage des poussières ou à la sédimentation en continu, par brumisation par exemple. Comme nous l'avons vu (confer Résultats § aethalométrie), l'utilisation du jet diffusé d'attaque, qui projette un nuage de gouttelettes dispersées sur le foyer de combustion, modifie les conditions de pyrolyse et génère probablement des résidus de combustion d'une fraction granulométrique plus grossière, qui sont plus efficacement stoppés par les

équipements de protection respiratoire filtrants (FFP2). L'utilisation de ce dispositif en caisson répond d'abord aux impératifs de formation, spécialement dans les caissons dits d' « attaque ».

L'effet immédiat du jet dans le caisson d'observation est une baisse de la température par refroidissement des gaz de combustion. Presque immédiatement, la vapeur produite puis échauffée aux températures élevées (thermocouple indiquant 800°C) conduit à une expansion volumique d'un facteur de plus de 3500. Le flux thermique est démultiplié du fait de la haute effusivité de la vapeur, et les intervenants dans le caisson, exposés à ces milliers de mètres-cubes de vapeurs, doivent réguler l'arrivée d'eau sous peine d'être trop exposés sur le plan thermique.

En fin de manœuvre, un apport hydrique pour transformer les résidus de combustion en boue pose plusieurs problèmes : d'abord la stagnation de ces boues compromettrait la salubrité du local d'exercice. Ensuite l'exposition du matériel à l'eau entraîne des phénomènes oxydatifs accélérés qui diminueraient drastiquement la durée de vie du caisson lui-même. Mais surtout se pose le problème de l'élimination de telles boues, qui relèverait de l'article R211-25 du code de l'environnement (41) et nécessiterait un traitement spécifique, complexe et coûteux.

D'autre part, il convient d'envisager les effets sur le processus et la dynamique de combustion. Le rapport d'équivalence de la réaction montre :

$$\phi = \frac{m_{comb}/m_{O_2}}{(m_{comb}/m_{O_2})_{st.}}$$

Lorsque la part d'oxygène diminue (ventilation insuffisante ou vapeur d'eau autour du foyer), le numérateur s'éloigne du rapport stœchiométrique, le rapport d'équivalence ϕ devient très supérieur à 1, la combustion est dite « pauvre », elle est contrôlée par le comburant et génère davantage d'imbrûlés. Donc des débris de plus gros diamètre, mais plus nombreux.

Spécificités de la surveillance médicale du personnel exposé

La question de la surveillance particulière des formateurs caisson est une question d'actualité. Il existe une surveillance sanitaire organisée au sein des SDIS pour l'ensemble du personnel pompier. L'évaluation médicale d'aptitude annuelle ou bisannuelle est effectuée par un médecin sapeur-pompier habilité, sur la base du profil médical critérié SIGYCOP ; ses modalités sont fixées par l'arrêté du 6 mai 2000. Ce contrôle médical standardisé suffit-il pour les formateurs caisson ? Plusieurs centres ont déjà mis en place une surveillance particulière en lien avec les contraintes physiologiques et le risque cardiovasculaire. Peut-on envisager d'y incorporer des éléments de surveillance spécifiques de

leur exposition au danger chimique ?

La consultation de la littérature ainsi que les résultats de cette étude apportent plusieurs éléments de réponse.

L'exposition aux particules peut entraîner des troubles de la fonction respiratoire. L'examen annuel comprend un examen fonctionnel respiratoire par spirométrie, mais compte-tenu de l'exposition somme toute modeste aux particules, on peut penser que les formateurs ne présentent pas un sur-risque significatif de développer des troubles obstructifs par rapport aux autres pompiers. Pour les formateurs ayant une fonction respiratoire normale (spirométrie +/- plethysmographie), une attention particulière doit cependant être portée lors de l'anamnèse aux signes cliniques d'hyperréactivité bronchique. Le cas échéant, des tests de provocation doivent être envisagés.

Comme évoqué en introduction, il existe un sur-risque de mélanome chez les pompiers. Il pourrait être intéressant d'intégrer une stratégie de diagnostic spécifique précoce du mélanome dans la consultation d'aptitude (42).

Concernant la néoplasie prostatique, l'intégration du dépistage à la visite d'aptitude serait délicate, alors que les modalités du dépistage font l'objet de débats scientifiques encore non tranchés et tandis que les recommandations en terme de modalités du dépistage sont discordantes entre les différentes sociétés scientifiques faisant autorité en urologie.

De nombreux éléments dans la littérature montrent un risque hématologique particulier chez les pompiers. La pertinence d'un examen biologique de dépistage (hémogramme, voire électrophorèse des protéines sériques) dans le bilan des formateurs qui sont particulièrement exposés doit être questionnée.

Une attention particulière doit être accordée au comptage et au traçage du nombre de passages en caisson. De futures normes sanitaires, recommandations ou études d'impact rendront possiblement intéressant une rétrospection dans le dossier des sapeurs-pompiers ayant été exposés au risque particulier du caisson de formation. Un modèle de fiche de prévention a été fournie par voie réglementaire⁸. Cet outil pourrait également servir de support à une adaptation du temps de travail, afin d'homogénéiser les fréquences de passage en caisson.

Les relevés effectués dans le caisson retrouvent, comme cela a déjà été décrit, plusieurs substances organiques volatiles et aromatiques polycycliques dégagées lors de la combustion, qui peuvent s'adsorber en surface des particules et pénétrer dans l'organisme suite à l'inhalation des poussières lors du déblai. Certaines de ces substances, comme le benzène ou le toluène, sont classées CMR⁹, l'exposition à ces substances donne lieu à des

⁸ Arrêté du 30 janvier 2012 relatif au modèle de fiche prévu à l'article L4121-3-1 du code du travail.

⁹ Substance classée cancérigène, mutagène et reprotoxique par l'office d'enregistrement, d'évaluation et d'autorisation des produits chimiques.

dispositions particulières et doit faire pratiquer un suivi médical plus suivi (R. 4412-44 à 58), sans que le contenu ni la fréquence du suivi ne fassent l'objet d'une fixation réglementaire. Ce sont les mesures de limitation d'exposition qui sont mises au premier plan, lorsque l'éviction ou la substitution de ces agents n'est pas possible (43). Une surveillance clinique particulière aurait certainement peu d'intérêt pour les doses auxquelles le personnel semble être exposé.

Compte-tenu du lien établi entre l'exposition aux particules ultrafines (PM2.5) et le risque cardio-vasculaire (44), la mise en place d'un examen fonctionnel cardiovasculaire (électrocardiogramme d'effort) en fonction du risque cardiovasculaire de l'agent paraît judicieuse.

La surveillance biologique (ou biomonitoring), consiste dans le dosage de marqueurs d'exposition chimiques dans les fluides corporels. Ce mode de surveillance fait l'objet d'une documentation de plus en plus fournie dans la littérature, nous avons déjà évoqué les travaux réalisés dans cette optique pour le risque chimique en caisson. Les conclusions de cette étude concernant l'intérêt d'une telle surveillance seront limitées du fait de la méthodologie semi-quantitative utilisée pour la détection des polluants accessibles au biomonitoring et de la focale mise sur les particules.

Il existe de nombreux marqueurs biologiques des expositions aux substances mises en évidence dans le caisson, dont la spécificité, les seuils et la pertinence sont sujets à de nombreuses discussions. Le 1-hydroxypyrene et le 3-hydroxybenzo[a]pyrene urinaire semblent les plus représentatifs d'une exposition aux HAP. L'utilisation de ces outils pose de nombreuses difficultés. Un prix élevé, une accessibilité réduite, ainsi que des conditions de recueil et de conservation complexes, en font des outils pour l'instant peu adaptés à un suivi au long cours des formateurs. Ces biomarqueurs constitueraient de précieux outils lors d'une campagne complémentaire d'évaluation du risque chimique.

La pertinence d'un suivi biologique de l'exposition au cyanure et aux nitriles, via un dosage des thiocyanates urinaires pourrait être intéressant (45). Une évaluation préalable de l'émission de tels composés dans le caisson est à envisager.

Extrapolation des résultats au déblai en opération

Un des objectifs, secondaire mais important, évoqué en introduction, était celui d'une comparaison *a minima* avec les expositions de l'une des activités les plus à risque parmi les différentes missions du pompier qui est le déblai.

Le déblai est une des dernières étapes de la marche générale des opérations face à un incendie, consistant en la mise à nu et l'extinction des foyers subsistants à l'issue de l'attaque. La persistance et la remobilisation des produits de dégradation thermique en font une phase à fort risque sur le plan chimique, faisant préconiser le port d'une tenue respiratoire isolante (46). C'est une différence qui contribue, avec le peu de données disponibles dans la littérature, à rendre l'extrapolation difficile avec la présente campagne de prélèvements.

Néanmoins, quelques éléments sont à retenir. D'abord la mise en œuvre de procédés de moto-ventilation, et plus généralement de tout appareil à réaction thermique sur le site ou à proximité du site d'intervention doit, comme nous l'avons vu, faire l'objet de mesures de précautions particulières.

On rappellera la présence de composés organiques volatils et d'hydrocarbures aromatiques polycycliques susceptibles de s'adsorber en surface des particules, avec un profil comparable avec les HAP retrouvés en zone de déblai (47). Cela doit faire rappeler l'intérêt de poursuivre une réflexion sur le suivi biologique (bio-monitoring), des marqueurs d'exposition, même si la législation actuelle sur ce domaine est pour le moins modeste¹⁰. La présence de ces composés lors de ces deux opérations doit encourager l'inter-comparaison des pratiques, notamment sur les processus de traitement des EPI contaminés.

Finalement, peut-être faudrait-il plutôt s'inspirer de la démarche de prévention adoptée dans le cadre du référentiel métier sur les recommandations d'équipement lors des opérations de déblai. Une réflexion doit être menée sur la place de l'équipement respiratoire isolant lors du nettoyage du caisson. L'intérêt en terme de protection, doit être mis en balance avec des contraintes réelles en termes physiologiques (48).

Limites de l'étude

Les limites de la campagne d'échantillonnage sont d'abord celles des limites intrinsèques des méthodes de prélèvement et de mesure.

La convention sous-estime habituellement la fraction inhalable des plus grosses

¹⁰ La seule substance pour laquelle il existe un marqueur biologique d'exposition réglementaire est le plomb.

particules pour une personne faisant face au vent, notamment si les vitesses du vent excèdent 4 m/s. (14,4km/h) (26). Les mouvements d'air générés par le motoventilateur ont donc pu faire sous-estimer la fraction la plus grossière de l'aérosol. Plus généralement, les conventions sont des approximations (18), qui ne tiennent pas compte des variables physiologiques telles que l'augmentation de la fréquence respiratoire lors de l'effort, ou le mode de respiration (nasal/buccal).

Comme nous pouvons le voir sur la carte de biais du dispositif, la méthode CIP-10 a tendance à sous-estimer les distributions les plus fines de l'aérosol dans la fraction alvéolaire (27). Plus généralement, les différentes techniques et matériels d'échantillonnage possèdent des caractéristiques et biais propres. Ces méthodes ont fait l'objet de plusieurs comparaisons dans la littérature (28), (29).

Le fait de traiter une problématique recentrée et circonscrite constitue plutôt une force de ce travail. Néanmoins, nous pourrions voir une certaine limite dans le parti-pris assumé de n'investiguer que la voie respiratoire de l'exposition chimique. Il est vrai que le risque sanitaire de l'activité liée au caisson ne se limite pas à cette seule voie d'exposition, ni même au seul risque chimique. Des études complémentaires explorant le risque thermique, l'exposition au bruit, ainsi que l'exposition chimique par voie cutanée doivent être menées.

De plus, une évaluation plus exhaustive du risque chimique par voie respiratoire aurait pu rendre compte de l'exposition à d'autres substances nocives telles que les oxydes d'azote, le dioxyde de soufre, les cyanures, les dioxines et furanes...

Du fait du caractère préliminaire de cette étude et en tant qu'évaluation globale du risque par inhalation, trop peu de mesures ont pu être réalisées. Il n'est donc pas possible d'extrapoler un modèle d'exposition ou d'effectuer une analyse statistique robuste. Nous pouvons anticiper un échantillonnage trop faible pour faire l'objet d'une analyse statistique compte-tenu à la fois du faible temps d'exposition des formateurs dans le caisson à l'issue du brûlage par rapport à la période de référence de 8h00 et du nombre limité de sessions de brûlage organisables sur une campagne de prélèvements de plusieurs jours.

Néanmoins, l'organisation de plusieurs séances de prélèvement a pu permettre d'atteindre un seuil de quantification valide pour certaines mesures particulières. Nous pouvons par exemple calculer le temps minimal de prélèvement déduit de la limite de quantification (30) pour la fraction PM_{2.5}, prélevée individuellement avec l'impacteur IP-10A sur pompe de débit 10 L.min⁻¹, pour lequel nous avons le plus grand échantillon.

La limite de quantification est donnée par la formule : $LQ_M = 10 \times \sigma$

On calcule l'écart type (σ) pour cette série de mesure :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \times \left(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right)} \approx 1.175$$

Soit pour un objectif de concentration arbitrairement fixée à $16 \mu\text{g.m}^{-3}$ ¹¹, nous avons :

$$\Delta t = \frac{10 \times \sigma}{C_e \times Q_s} = \frac{10 \times 1.175}{0.016 \times 10} \approx 73.44$$

avec Δt = Temps minimum d'échantillonnage

C_e = Concentration d'aérosol estimée

Q_s = Débit de l'échantillonneur (L.min^{-1})

Avec les 6 prélèvements d'au moins 15 minutes, le seuil de quantification et *a fortiori* le seuil de détection sont atteints.

Enfin, hormis la concentration de formaldéhyde durant le brûlage, aucune série de mesures ne montre de résultat supérieur à 10% de sa valeur limite d'exposition (cf. infra). Nous pouvons donc considérer que la situation est probablement acceptable dans l'optique d'une comparaison aux valeurs réglementaires et sous réserve d'investigations complémentaires (31).

Forces de l'étude

Il s'agit d'un travail original, en ce que l'exposition au danger chimique par inhalation lors des entraînements en caisson de brûlage n'a pour l'instant pas fait l'objet d'étude spécifique, spécialement en ce qui concerne la gravimétrie et la granulométrie de la fraction particulaire de l'aérosol.

L'intervention du laboratoire d'aérologie de Toulouse ainsi que du département métrologie des polluants de l'INRS ont contribué, par leur expertise, à la qualité des analyses métrologiques et à la campagne de prélèvements en général. Il a été possible de critiquer chaque mesure et de mettre en perspective les résultats avec les contraintes techniques et les conditions de réalisation.

Une des forces de ce travail est d'avoir pu mettre en œuvre un panel métrologique suffisamment large, avec des mesures à la fois individuelles et « d'ambiance », intégrées et résolues temporellement, avec une grande variété de méthodes d'échantillonnage pour l'étude gravimétrique et granulométrique.

¹¹ Valeur-repère biennale de la concentration particulaire PM2.5 en air intérieur du Haut Conseil de la santé publique pour 2019.

Synthèse des recommandations

Résumons les grandes lignes des recommandations tirées des principaux résultats :

1. Procéder à l'opération de déblai avant le brûlage et le plus à distance possible du brûlage précédent.
2. Envisager le port de l'ARI durant le déblai et à défaut, s'équiper du plus haut niveau de protection respiratoire filtrant possible.
3. Proscrire l'usage du motoventilateur à l'intérieur du caisson.
4. Porter des sous-gants.
5. Intégrer la notion de risque dans le choix du combustible.
6. Limiter les quantités de combustible au minimum nécessaire.
7. Intégrer à la manœuvre des procédés d'aspiration, d'humidification, voire des aménagements matériels (surélévation du foyer, trappe...).
8. Standardiser la chaîne d'hygiène des EPI.
9. Tenir le compte des déblais en caisson et homogénéiser les fréquences de passage.
10. Réfléchir aux éléments spécifiques de la surveillance médicale des formateurs et particulièrement à la place du dépistage du mélanome, de la numération et formule sanguine, des tests de provocation bronchique et des épreuves d'effort.
11. Encourager l'inter-comparaison des centres de formation pour se diriger vers une harmonisation des pratiques.
12. Rationaliser, systématiser et protocoliser toute la procédure.
13. Continuer l'étude de l'impact sanitaire du caisson et hiérarchiser les risques encourus.

CONCLUSION

Le nettoyage des caissons de brûlage à l'issue de l'entraînement est une opération exposant les sapeurs-pompiers à un danger chimique par inhalation spécifique. Cette étude a permis de brosser un profil général et d'offrir une bonne vision globale de ce risque chimique hybride.


L'hétérogénéité des pratiques constitue un frein important à la gestion du risque dans le cadre de cette activité. En ce sens, il faut encourager les actions de coopération, pour tendre vers une harmonisation et une systématisation des pratiques.

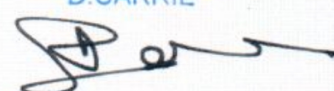
Au vu des résultats généraux de la campagne de mesures, avec les réserves qu'imposent à la fois un profil d'exposition composite et la détection dans l'aérosol de certaines substances critiques, nous pouvons qualifier le risque global de modéré.

Il a également été possible d'émettre plusieurs propositions d'aménagement de l'exercice qui concourraient à réduire l'exposition chimique des pompiers, à l'aide d'éléments à la fois matériels et organisationnels synthétisés en une liste de recommandations. Il est souhaitable de poursuivre une collaboration entre des acteurs scientifiques spécialistes du risque professionnel, les services de santé et de secours médical et les départements de formation au sein des SDIS, afin de concevoir et de promouvoir les solutions de prévention.

La pertinence d'une comparaison avec le risque chimique lors des opérations de déblai en opération réelle a pu être partiellement éclairée.

Cette étude a permis d'obtenir un éclairage sur le risque chimique par inhalation lors des entraînements en caisson de brûlage, qui pourra permettre d'orienter des investigations ultérieures. L'évaluation et la caractérisation du risque chimique et plus généralement du risque global lié à cette activité, doivent être poursuivies, pour le plus grand intérêt des sapeurs-pompiers et la protection de leur santé.

Vu
Toulouse le 24/04/2018

Le Président du Jury
Professeur Pierre MESTRE
Médecine Générale

Toulouse, le 25/04/18
Vu permis d'imprimer
Le Doyen de la Faculté
de Médecine Purpan
D.CARRIE


BIBLIOGRAPHIE

1. Hamra GB, Guha N, Cohen A, Laden F, Raaschou-Nielsen O, Samet JM, et al. Outdoor particulate matter exposure and lung cancer: a systematic review and meta-analysis. *Environ Health Perspect.* 2014;122(9):906.
2. Neghab M, Mohraz MH, Hassanzadeh J. Symptoms of respiratory disease and lung functional impairment associated with occupational inhalation exposure to carbon black dust. *J Occup Health.* 2011;53(6):432-8.
3. Straif K, Baan R, Grosse Y, Secretan B, Ghissassi FE, Bouvard V, et al. Carcinogenicity of shift-work, painting, and fire-fighting. *Lancet Oncol.* 1 déc 2007;8(12):1065-6.
4. Glass DC, Pircher S, Del Monaco A, Vander Hoorn S, Sim MR. Mortality and cancer incidence in a cohort of male paid Australian firefighters. *Occup Env Med.* 2016;
5. Tsai RJ, Luckhaupt SE, Schumacher P, Cress RD, Deapen DM. Risk of cancer among firefighters in California, 1988–2007. *Am J Ind Med.* 2015;58(7):715–729.
6. Pukkala E, Martinsen JI. Cancer incidence among firefighters: 45 years of follow-up in five Nordic countries. *Occup Env Med.* 1 juin 2014;71(6):398-404.
7. LeMasters GK, Genaidy AM, Succop P, Deddens J. Cancer Risk Among Firefighters: A Review and Meta-analysis of 32 Studies. *J Occup Environ Med.* nov 2006;48(11):1189.
8. IARC. Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Vol. 98 Painting, Firefighting, and Shiftwork. Lyon: CIRC; 2010 p. 818. (Monographies du CIRC).
9. Direction de l'indemnisation et de la réadaptation. L'admissibilité de la lésion professionnelle / Note d'orientation du 04/04/2016. Canada: CNSSET; 2016 avr p. Section 9.11 de la politique 1.02.
10. Amadeo B, Marchand J-L, Moisan F, Donnadieu S, Coureau G, Mathoulin-Pélissier S, et al. French firefighter mortality: Analysis over a 30-year period. *Am J Ind Med.* 2015;58(4):437–443.
11. Lusa S, Louhevaara V, Smolander J, Kivimäki M, Korhonen O. Physiological responses of firefighting students during simulated smoke-diving in the heat. *Am Ind Hyg Assoc J.* mai 1993;54(5):228-31.
12. Gaughan DM, Piacitelli CA, Chen BT, Law BF, Virji MA, Edwards NT, et al. Exposures and Cross-shift Lung Function Declines in Wildland Firefighters. *J Occup Environ Hyg.* 2 sept 2014;11(9):591-603.
13. Pescher D. Stratégie relative à la prise en compte des risques des fumées d'incendie pour la sécurité et la santé des sapeurs-pompiers. Direction générale de la sécurité civile et de la gestion des crises; 2017 nov.
14. Stalnaker CK. Characterization of firefighter exposures during fire overhaul. *Prof Saf.* 1 mars 2001;46(3):37.
15. Kirk KM, Logan MB. Firefighting instructors' exposures to polycyclic aromatic hydrocarbons during live fire training scenarios. *J Occup Environ Hyg.* 2015;12(4):227-34.

16. Laitinen J, Mäkelä M, Mikkola J, Huttu I. Fire fighting trainers' exposure to carcinogenic agents in smoke diving simulators. *Toxicol Lett.* 15 janv 2010;192(1):61-5.
17. Oberdörster G, Oberdörster E, Oberdörster J. Nanotoxicology: an emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. *Environ Health Perspect.* 2005;113(7):823.
18. Comité européen de normalisation. EN481 - Atmosphère des lieux de travail - Définition des fractions de taille pour le mesurage des particules en suspension dans l'air. 1993.
19. République Française. R4222-10. Code du travail. Sect. 3 : Locaux à pollution spécifique, Décret n°2008-244- (V) mars 7, 2008.
20. Renard J-B, Dulac F, Berthet G, Lurton T, Vignelles D, Jégou F, et al. LOAC: a small aerosol optical counter/sizer for ground-based and balloon measurements of the size distribution and nature of atmospheric particles—Part 1: Principle of measurements and instrument evaluation. *Atmospheric Meas Tech.* 2016;9(4):1721–1742.
21. Nerisson P. Modélisation du transfert des aérosols dans un local ventilé [PhD Thesis]. Institut National Polytechnique de Toulouse; 2009.
22. Karanasiou A, Minguillón MC, Viana M, Alastuey A, Putaud J-P, Maenhaut W, et al. Thermal-optical analysis for the measurement of elemental carbon (EC) and organic carbon (OC) in ambient air a literature review. *Atmospheric Meas Tech Discuss.* 2015;8(9).
23. Directive 2008/50/CE du Parlement européen et du Conseil du 21 mai 2008 concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe. 152, 32008L0050 juin 11, 2008.
24. Dron J. Analyse fonctionnelle par spectrométrie de masse tandem: application aux aérosols organiques atmosphériques. Université de Provence-Aix-Marseille I; 2008.
25. Ahmad W. Formation d'aérosols organiques secondaires dans l'oxydation du limonène et des méthoxyphénols: Etude de l'influence des conditions environnementales. In Université du Littoral Côte d'Opale; 2017.
26. Lafon D, Blanchard O, Nonat A. La métrologie des empoussiérages. 1996.
27. INRS. Prélèvement des aérosols par le dispositif CIP 10 - Fiche Métropol. 2015 oct.
28. Kauffer E, Wrobel R, Görner P, Rott C, Grzebyk M, Simon X, et al. Comparaison sur site dans l'industrie du bois de quelques échantillonneurs d'aérosol.
29. Görner P, Wrobel R, Mička V, Škoda V, Denis J, Fabriès J-F. Study of fifteen respirable aerosol samplers used in occupational hygiene. *Ann Occup Hyg.* 1 janv 2001;45(1):43-54.
30. FD CEN/TR 15230 - Atmosphères de lieux de travail - Guide pour l'échantillonnage des fractions d'aérosols inhalables, thoraciques et alvéolaires. 2005.
31. INRS. Interprétation statistique des résultats de mesure - Fiche Métropol. 2016.
32. AISS I. Valeurs limites d'exposition pour la prévention des risques chimiques. 2016 nov. Report No.: ED6254.

33. Décret n° 2009-1570 du 15 décembre 2009 relatif au contrôle du risque chimique sur les lieux de travail. 2009-1570 déc 15, 2009.
34. Arrêté du 30 juin 2004 établissant la liste des valeurs limites d'exposition professionnelle indicatives en application de l'article R. 232-5-5 du code du travail.
35. Satish U, Mendell MJ, Shekhar K, Hotchi T, Sullivan D, Streufert S, et al. Is CO2 an Indoor Pollutant? Direct Effects of Low-to-Moderate CO2 Concentrations on Human Decision-Making Performance. *Environ Health Perspect.* déc 2012;120(12):1671-7.
36. Huré P, Guimon M. Les appareils de protection respiratoire: choix et utilisation. INRS; 2002.
37. NF EN 529 Appareils de protection respiratoire - Recommandations pour le choix, l'utilisation, l'entretien et la maintenance - Guide. 2006.
38. Service public. Les sapeurs-pompiers au bord de l'asphyxie. *L'Humanité.* 2017.
39. Bluedevil J, Le Guelaff M, Vinay R, Morizot S, Zaglia C. Premier colloque français pour les moniteurs incendies. *Soldats du feu magazine.* 2013;(56):52.
40. République Française. R4222-12. Code du travail. Sect. 3 : Locaux à pollution spécifique, Décret n°2008-244- (V) mars 7, 2008.
41. République Française. R211-25. Code de l'environnement. Sect. Section 2 : Déversement susceptibles d'altérer la qualité de l'eau et de porter atteinte aux milieux aquatiques, Décret 2007-397 2007-03-22 JORF 23 mars 2007 mars 23, 2007.
42. Stratégie de diagnostic précoce du mélanome - Recommandations en santé publique. Rapport d'évaluation. HAS; 2006 oct.
43. Marcant C, Maurice S, Moesch C. Appréhension du risque CMR chez les sapeurs-pompiers. Aix-en-Provence: École Nationale Supérieure des Officiers Sapeurs-Pompiers; 2011. 1 vol (41 p. annexes).
44. Nalbone G. Pollution par les particules atmosphériques fines et ultrafines et risque cardiovasculaire. *Médecine Longévité.* 1 mars 2010;2(1):22-39.
45. Michel X, Bohand S, Laroche P. Intoxication cyanhydriques professionnelles des pompiers : mythe ou réalité? INRS - Documents pour le médecin du travail. 2011;128:603-14.
46. Guide nationale de référence : Appareils Respiratoires Isolants. DDSC, Sous-direction des services de secours et des sapeurs-pompiers; 1999 avr p. 5.
47. Anthony TR, Joggerst P, James L, Burgess JL. Method development study for APR cartridge evaluation in fire overhaul exposures. *Ann Occup Hyg.* 31 oct 2007;51(8):703-16.
48. Pantaloni F, Capitaine C, Le Duff F, Steve J-M. Tolérance physique au port de l'appareil respiratoire isolant chez les sapeurs-pompiers. *Arch Mal Prof Environ.* 2010;71(5):790-7.

GLOSSAIRE

Aethalométrie : Du grec ancien αἰθᾶλος, signifiant “suie”. L'aethalométrie est la mesure en continu de la teneur de l'atmosphère en carbone suie. Le carbone suie est la matière provenant de la pyrogénéation du bois.

Composé organique volatil (COV) : Vocabulaire recouvrant une grande variété de substances chimiques ayant pour point commun d'être des composés du carbone et d'être volatils à température ambiante.

Hydrocarbure aromatique polycyclique (HAP) : Ce sont des composés organiques constitués par plusieurs cycles aromatiques condensés. De façon usuelle, on parle d'HAP, même lorsque la règle d'aromaticité de Hückel¹² n'est pas respectée, comme pour le pyrène par exemple. De même, on parle en pratique d'HAP pour des composés organiques hétérocycliques, ne répondant pas à la définition stricte d'hydrocarbure, et dont la formule n'est donc pas C_nH_m .

Métrologie : Science de la mesure ou technique de mesure appliquée à un domaine particulier.

¹² Est aromatique un hydrocarbure plan possédant $4n + 2$ électrons délocalisables dans un système cyclique (où n est un entier naturel quelconque).

ANNEXE I – Figures et tableaux

Tab. 1 : Conditions environnementales à Rodez les 5, 6, et 7 mars 2016¹³

	05/04/16	06/04/2016	07/04/2016
Température maximale	11°	10°	10°
Température minimale	10°	6°	5°
Pression	1016 hPa	1018 hPa	1018 hPa
Vitesse moyenne du vent	8 km/h	16 km/h	17 km/h
Précipitations	17 mm	1 mm	2 mm
Humidité	98 %	89 %	91 %
Point de rosée	11°C	6°C	6°C

Tab. 2 : Concentrations massiques mesurées par analyse gravimétrique des supports de collecte (filtre ou coupelle de CIP 10)

Dispositif de prélèvement	Fraction conventionnelle	Nature du prélèvement	Type de support	Volume prélevé (L)	Masse prélevée (mg)	Concentration massique (mg.m ⁻³)
Cassette fermée	Inhalable	Point fixe C	Filtre Quartz 37mm	115.4	0.759	6.58
		Individuel	Membrane PVC 37 mm	85.57	0.777	9.08
				117.13	1.056	9.02
CIP 10-1	Inhalable	Individuel	Coupelle + mousse	581.2	11.722	20.17
				582.9	8.858	15.20
Cyclone GK 2.69	Alvéolaire	Point fixe C	Filtre Quartz 37mm	201.7	0.327	1.62
				222.4	0.170	0.76
Cyclone GK 4.192	Alvéolaire	Point fixe C	Filtre Quartz 47mm	528.9	1.585	3.00
CIP 10-R	Alvéolaire	Individuel	Coupelle + mousse	578.3	0.275	0.48
				578.3	0.232	0.40

¹³ Source : <https://www.worldweatheronline.com>

Tab. 3 : Concentrations massiques mesurées par analyse gravimétrique des supports de collecte (filtre ou coupelle de CIP 10)

Dispositif de prélèvement	Fraction granulométrique	Nature du prélèvement	Type de support	Jour de prélèvement	Concentration massique (mg.m ⁻³)
Cyclone, Porte-filtre polycarbonate 47 mm	PM1	Point fixe 1m	Filtre Quartz 47mm	J 1	1.04
				J 2	1.15
				J 3	0.8
Impacteur PEM SKC	PM2.5	Individuel	Filtre Quartz 37mm	J 1	1.65
					1.7
				J 2	5.13
					2.2
				J 3	2.48
					2.6
Cyclone, Porte-filtre polycarbonate 47 mm	PM2.5	Point fixe 1m	Filtre Quartz 47mm	J 1	2.05
				J 2	1.55
				J 3	1.15
Porte-filtre polycarbonate 47 mm	Particules totales en suspension	Point fixe 1.5m	Filtre Quartz 47mm	J 1	6.03
				J 2	18.12
				J 3	11.82

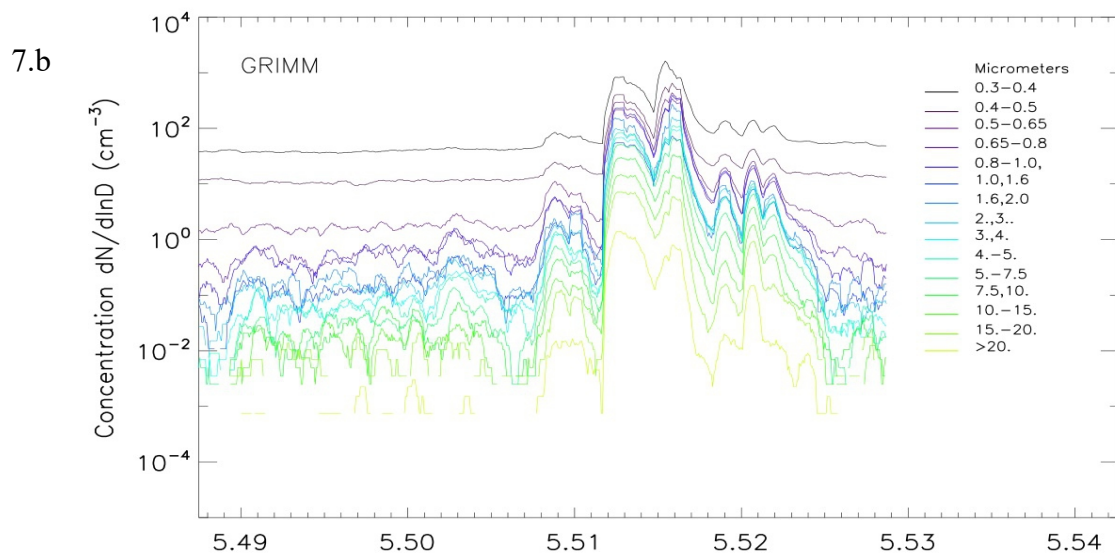
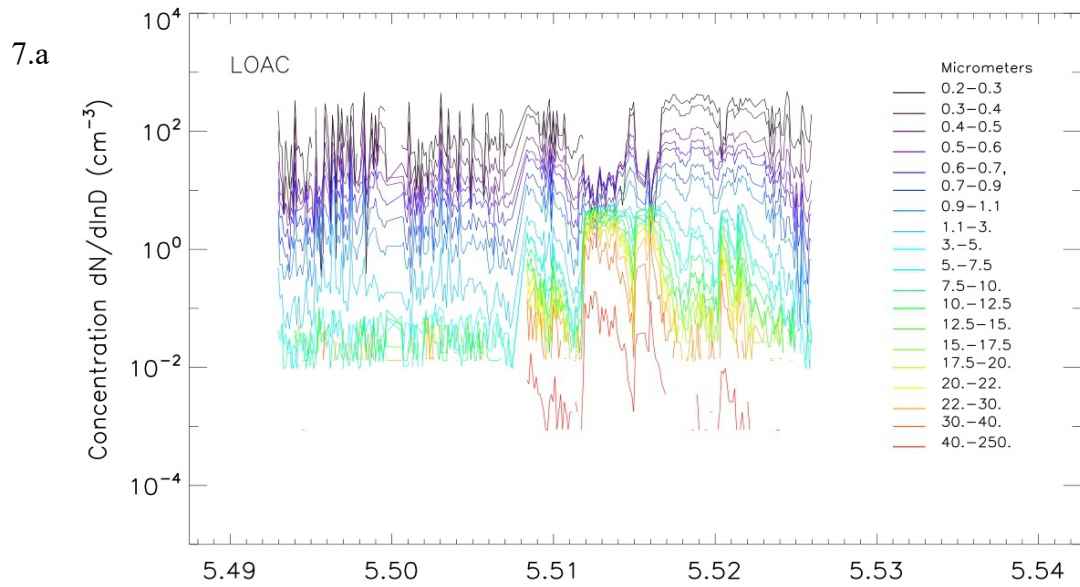


Fig. 7 : Comparaison des profils granulométriques de l'aérosol.
7.a : LOAC ; 7.b : GRIMM

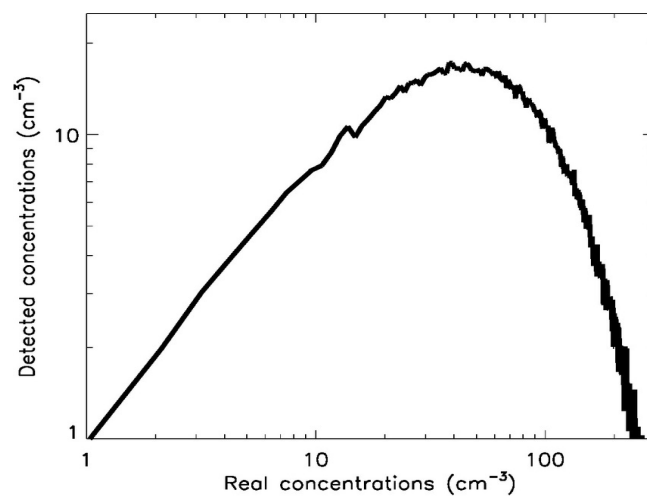
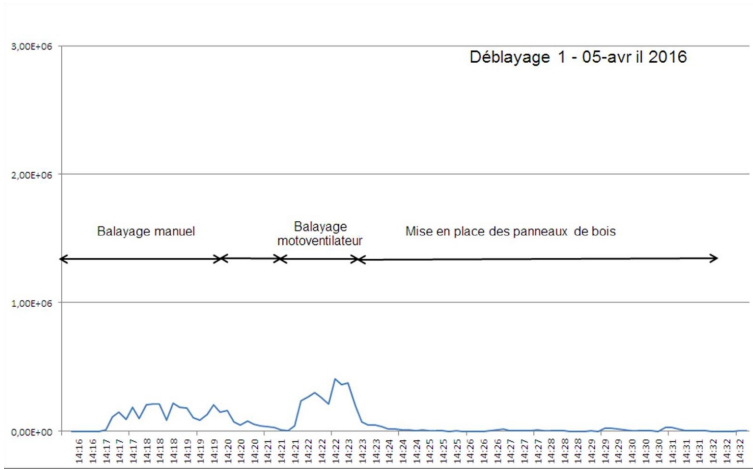
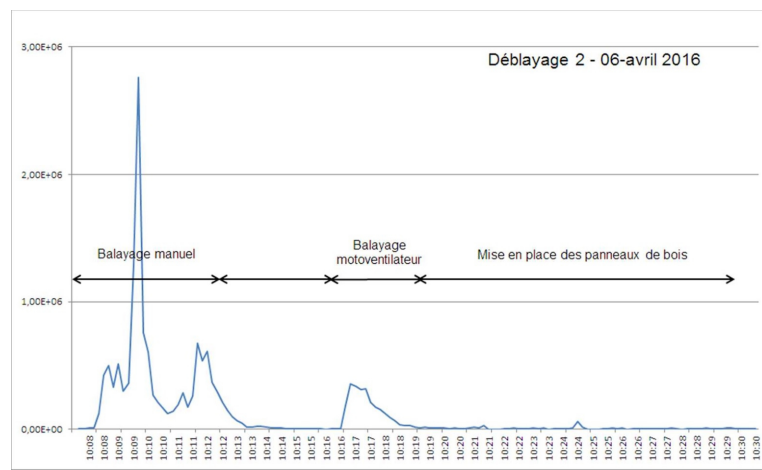


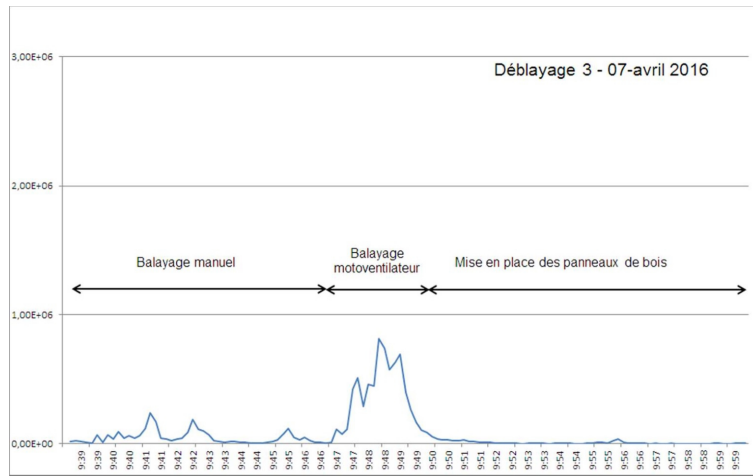
Fig. 8 : Modélisation de Monte-Carlo pour le comptage de particules de diamètre supérieur à $1\mu\text{m}$.



9.a



9.b



9.c

Fig. 9.a,b,c : Émissions de suie en fonction du temps durant les jours 1, 2, et 3.

Tableau 4 : Concentrations en carbone mesurées par analyse thermo-optique des supports de collecte (recueil sur filtres en fibres de quartz).

Dispositif de prélèvement	Fraction conventionnelle	Nature du prélèvement	Type de support	Volume prélevé (L)	Masse prélevée (mg)	[Carbone] ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)
Cassette fermée	Inhalable	Point fixe C	Filtre Quartz 37mm	115.4	0.113	0.98
Porte filtre 90 mm	Particules totales en suspension	Point fixe C 1.4 m du sol	Filtre Quartz 90mm	703.2	1.932	2.75
Dorr-Oliver	Alvéolaire	Point fixe A	Filtre Quartz 37mm	100.8	0.043	0.42
Simpeds	Alvéolaire	Point fixe B	Filtre Quartz 37mm	127.6	0.060	0.47
Dorr-Oliver	Alvéolaire	Point fixe B	Filtre Quartz 37mm	98.6	0.042	0.42
Dorr-Oliver	Alvéolaire	Point fixe B	Filtre Quartz 37mm	98.9	0.044	0.45
Cyclone GK 2.69	Alvéolaire	Point fixe C	Filtre Quartz 37mm	201.7	0.065	0.32
Cyclone GK 2.69	Alvéolaire	Point fixe C	Filtre Quartz 37mm	222.4	0.041	0.19
Cyclone GK 4.162	Alvéolaire	Point fixe C	Filtre Quartz 47mm	528.9	0.230	0.43
Simpeds	Alvéolaire	Individuel	Filtre Quartz 37mm	128.8	0.035	0.27
Simpeds	Alvéolaire	Individuel	Filtre Quartz 37mm	127.6	0.035	0.30

Tab. 5 : Charge carbonée et rapport OC/CE de la fraction PM2.5 recueillie sur prélèvements individuels

	Pompier A		Pompier B	
	TC (mg/m^3)	OC/EC	TC (mg/m^3)	OC/EC
Jour 1	0.57	0.34	0.82	0.41
Jour 2	0.77	0.18	0.56	0.16
Jour 3	0.59	1.10	0.59	0.86

Tab. 6 : Charge carbonée et rapport OC/CE des prélèvements environnementaux

	PM1		PM2.5		TSP	
	TC (mg/m^3)	OC/EC	TC (mg/m^3)	OC/EC	TC (mg/m^3)	OC/EC
Jour 1	0.07	N/A	0.10	0.4	1.73	0.35
Jour 2	0.05	N/A	0.12	0.43	2.39	0.21
Jour 3	<0.01	N/A	0.07	N/A	1.46	0.34

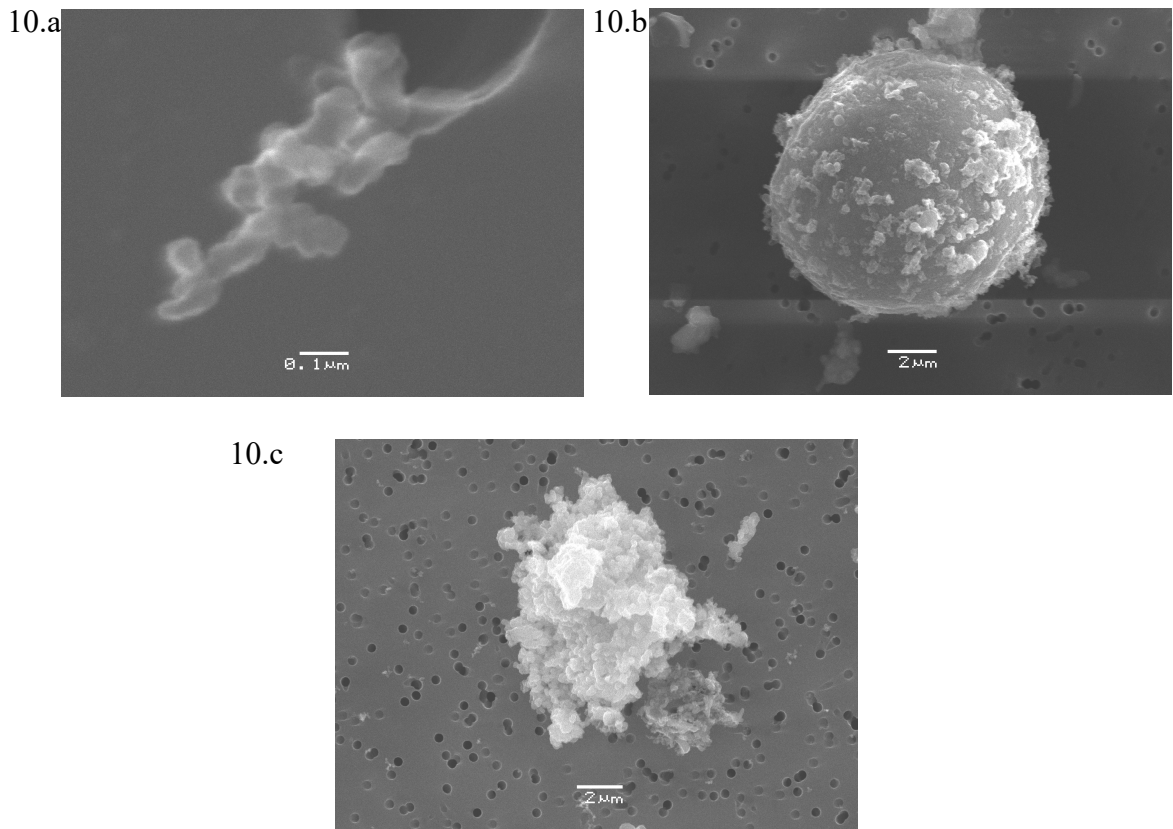


Fig. 10.a,b,c : Microscopie électronique à balayage. 10.a : Suies avec quelques traces de sphérules de carbone ; 10.b et 10.c : cendres contenant des sels de silicium et de calcium et oxydes métalliques.

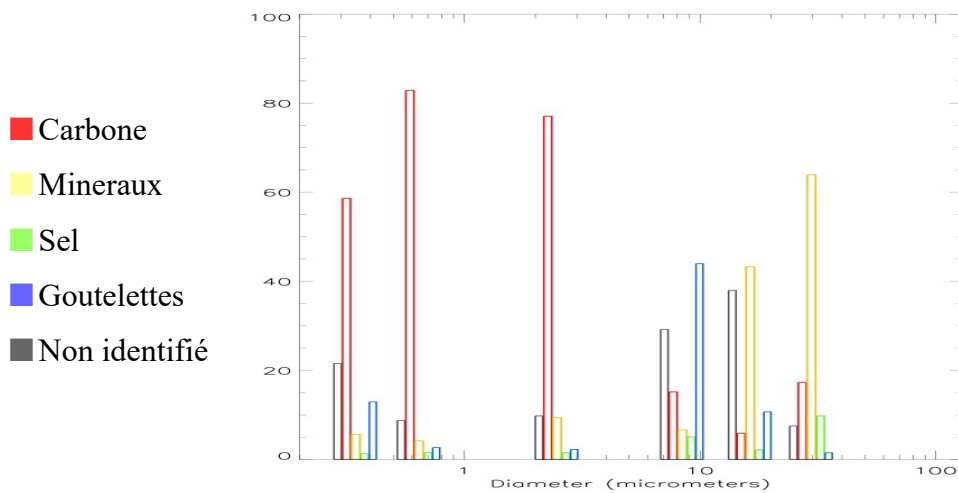


Fig. 11 : Spéciation de la fraction totale de l'aérosol par LOAC

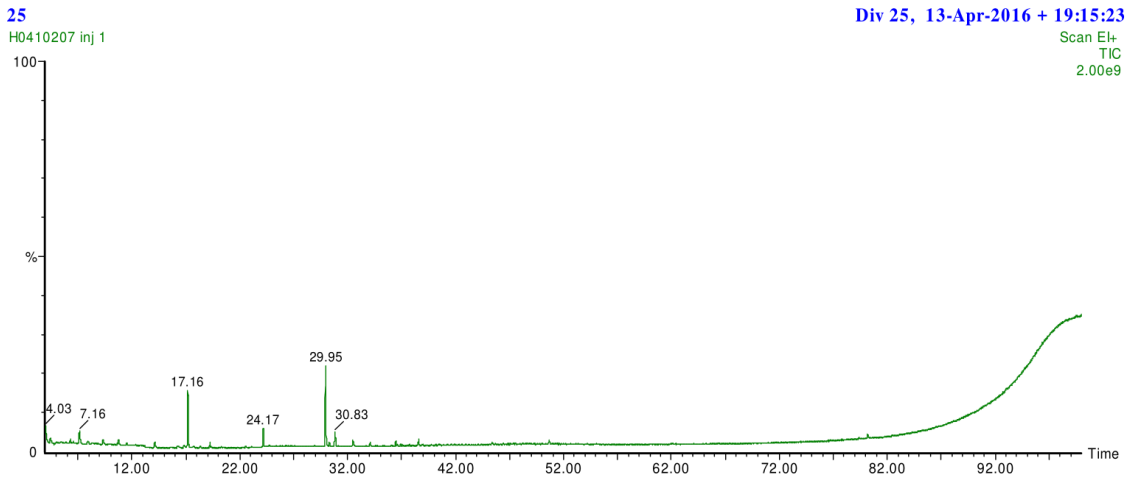


Fig. 12 : Identification des COV par chromatogramme obtenu par prélèvement après l'opération de brûlage

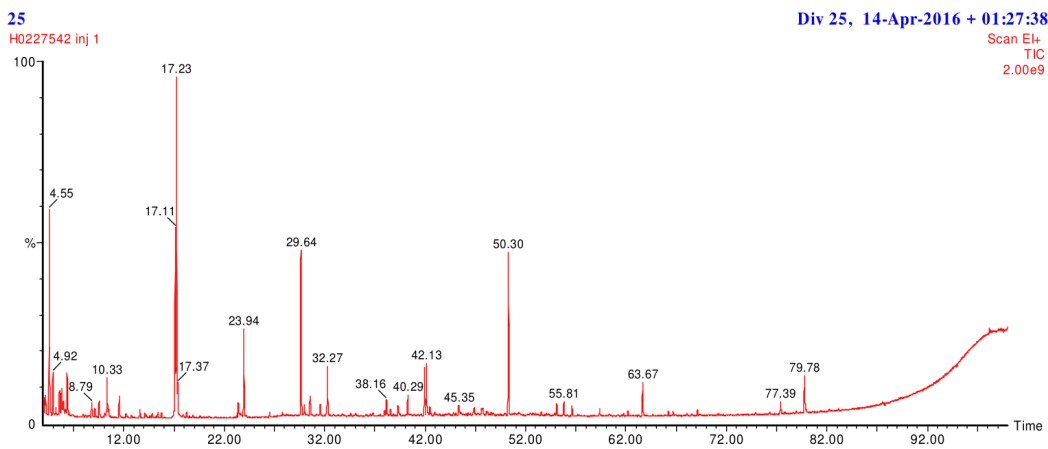


Fig. 13 : Identification des COV par chromatogramme obtenu par prélèvement pendant l'opération de brûlage

Tab. 7 : Concentrations en aldéhydes mesurées pendant l'opération de déblai

Nature du prélèvement	Volume prélevé (L)	Formaldéhyde	
		Masse prélevée (mg)	[mg.m ⁻³]
Individuel	43.2	0.566	0.013
Individuel	41.9	0.445	0.011
Point fixe A	28.8	0.400	0.014
Point fixe B	30.3	0.484	0.016

Tab. 8 : Concentrations en aldéhydes mesurées pendant l'opération de brûlage

Nature du prélèvement	Volume prélevé (L)	Formaldéhyde		Acétaldéhyde	
		Masse prélevée (mg)	(mg.m ⁻³)	Masse prélevée (mg)	[mg.m ⁻³]
Point fixe	10.0	14.921	1.49	22.518	2.25

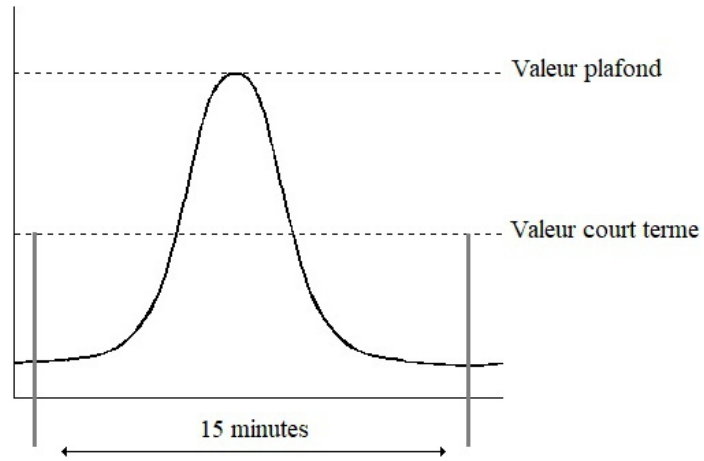


Fig. 14 : Exposition à une substance en fonction du temps.
Illustration d'un pic par rapport aux valeurs plafonds et court terme.

ANNEXE II – Notices techniques

Cassette fermée

- Norme NF X 43-257
- Fiche INRS Métropol M-274 : Prélèvement en mode Actif sur cassette et analyse par gravimétrie de la (des) substance(s) : Aérosols en fraction inhalable.

Cyclone GK 2,69, Cyclone GK 4,162 et Dorr-Oliver

- Norme NF X43-259
- Fiche INRS Métropol M-278 : Prélèvement en mode Actif sur cyclone et analyse par gravimétrie de la (des) substance(s) : Aérosols en fraction alvéolaire.

CIP-10

- Norme NF X43-262
- Fiche INRS M-279 : Prélèvement en mode Actif sur CIP10-I et analyse par gravimétrie de la (des) substance(s) : Aérosols en fraction alvéolaire.
- Fiche INRS M-281 : Prélèvement en mode Actif sur CIP10-A et analyse par gravimétrie de la (des) substance(s) : Aérosols en fraction inhalable.

PEM IP10-A / Échantillonneur SKC

- SKC Inc. IP-10A Method Update - Determination of fine particulate matter in indoor air using size-specific impaction. 2004.

Simpeds

- Blackford DB, Harris GW, Revell G. The reduction of dust losses within the cassette of the SIMPEDS personal dust sampler. Ann Occup Hyg. 1985;29(2):169–180.

Aldéhydes

- Norme NF X 43-264
- Fiche INRS M-4 : Prélèvement en mode Actif sur cartouche de silice imprégnée et analyse par HPLC détection UV de la (des) substance(s) : Formaldéhyde.
- Fiche INRS M-66 : Prélèvement en mode Actif sur cartouche de silice imprégnée et analyse par HPLC détection UV de la (des) substance(s) : Acétaldéhyde.

Compteur de poussières GRIMM

- I.C.S Intertek. Compteur de Poussières GRIMM - Spécifications techniques. 2010.

Light Optical Aerosol Counter (LOAC)

- Renard J-B, Dulac F, Berthet G, Lurton T, Vignelles D, Jégou F, et al. LOAC: a small aerosol optical counter/sizer for ground-based and balloon measurements of the size distribution and nature of atmospheric particles–Part 1: Principle of measurements and instrument evaluation. Atmospheric Meas Tech. 2016;9(4):1721–1742

Sunset Lab OC/CE carbon analyser

- Sunset Laboratory Inc. Semi-continuous OCEC Carbon Aerosol Analyzer - A guide to running and maintaining.

L'analyseur thermo-optique modèle 2001 DRI

- Desert Research Institute - Division of Atmospheric Sciences. DRI Standard Operating Procedure - DRI Model 2001 Thermal/Optical Carbon Analysis (TOR/TOT) of Aerosol Filter Samples - Method IMPROVE_A. 2005.

Q-TRAK 7575

- TSI Inc. Q-TRAK Indoor Air Quality Monitor Model 7575 - Operation and service manual. 2016.

Screening pour l'identification des COV

- Norme ISO 16071-1
- Oury B. Le « screening », un outil pour l'identification des composés organiques volatils dans une atmosphère de travail. INRS, département Métrologie des polluants; 2011. Report No.: ND 2346-224-11.

ANNEXE III – Illustrations des installations et des manœuvres



Fig. 15 : Caisson d'observation et d'entraînement aux phénomènes thermiques au SDIS de l'Aveyron.



Fig. 16 : Installation des panneaux de bois et du matériel d'échantillonnage fixe.



Fig. 17 : Installation du matériel d'échantillonnage individuel.

Évaluation du risque chimique par inhalation lors des entraînements en caisson de brûlage

Introduction : L'impact sanitaire de l'activité des formateurs sapeurs-pompiers dans les caissons de brûlage a peu été étudié sous l'angle du risque chimique par voie respiratoire. L'objectif de notre recherche est d'évaluer l'exposition des sapeurs-pompiers au danger chimique par inhalation lors des entraînements en caisson de brûlage.

Méthode : Nous avons réalisé une étude quantitative portant sur la gravimétrie et la granulométrie des poussières sans effets spécifiques, ainsi que sur la quantification de plusieurs gaz présents dans le caisson, durant une campagne de prélèvements du 5 au 7 avril 2016 au SDIS de Rodez.

Résultats : Les poussières sans effet spécifique ainsi que les gaz, dont plusieurs sont classés CMR, ont été mesurées à des concentrations inférieures à leurs valeurs limites d'exposition.

Conclusion : Cette étude permet de dresser un profil général du risque chimique par inhalation lors des entraînements en caisson de brûlage. Malgré une détection dans l'aérosol de certaines substances critiques, nous pouvons qualifier le risque global de modéré. Plusieurs moyens de réduction du risque ont pu être déduits des principaux résultats.

Mots-clefs : Pompiers ; Entraînement en caisson ; Risque chimique ; Poussières sans effet spécifique ; Hydrocarbures aromatiques polycycliques ; Composés organiques volatils.

Assessment of chemical exposure by respiratory route during smoke diving simulator training

Introduction: The health impact of the firefighter trainer's activity in smoke diving simulators has been little studied from the perspective of chemical exposure by respiratory route. The objective of this study is to assess the firefighters exposure to chemical inhalation when they work in smoke diving simulators.

Method: We carried out a quantitative study focused on the gravimetry and the granulometry of dust without specific effects, as well as on a quantification of several gases present in simulators, during a sampling campaign from April 5th to 7th, 2016, at the SDIS of Rodez.

Results: Dusts with no specific effect, and gases, many of which are classified as CMR, were measured at concentrations below their permissible exposure limit levels.

Conclusion: This study provides a general outline of the chemical risk by inhalation during simulator training. In spite of having detected some critical substances in the aerosol, we can qualify the overall risk as moderate. In view of the main results, we can make several recommendations for risk reduction.

Keywords : Firefighters ; Smoke diving simulators ; Chemical exposure ; Dusts without specific effect ; Polycyclic Aromatic Hydrocarbons ; Volatil organic compounds.

Discipline administrative : MÉDECINE GÉNÉRALE

Faculté de Médecine Rangueil - Route de Narbonne - TOULOUSE

Directrice de thèse : Monsieur le Docteur MAVIEL Patrick

Président de jury : Monsieur le Professeur MESTHÉ Pierre



LABORATOIRE
D'AÉROLOGIE

Service Départemental
d'Incendie et de Secours



Aveyron

