

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

Présentée et soutenue publiquement le 2018

par

Emmanuel DAVID

Exposition au 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 SOULAT Jean-Marc	Président de jury
Madame ...	Assesseur
Madame ...	Assesseur
Madame...	Assesseur
Monsieur le Docteur MAVIEL Patrick	Assesseur

Table des matières

INTRODUCTION.....	2
<i>Contexte</i>	<i>3</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.....	7
<i>Campagne de prélèvements.....</i>	<i>7</i>
<i>Dispositif expérimental.....</i>	<i>8</i>
<i>Éléments de métrologie des aérosols particuliers</i>	<i>8</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.....	10
Gaz et composés volatils.....	10
RÉSULTATS.....	11
<i>Poussières réputées sans effet spécifique.....</i>	<i>11</i>
Gravimétrie.....	11
Granulométrie.....	11
Aethalométrie.....	14
Charge carbonée.....	14
Analyse MEB.....	16
Spéciation.....	16
<i>Gaz.....</i>	<i>16</i>
Monoxyde de carbone.....	16
Dioxyde de carbone.....	16
Composés organiques volatils.....	16
Aldéhydes.....	18
DISCUSSION.....	19
<i>Limites de l'étude.....</i>	<i>19</i>
<i>Forces de l'étude.....</i>	<i>20</i>
<i>Réglementation en matière d'exposition.....</i>	<i>21</i>
<i>Comparaison des résultats aux limites d'exposition professionnelles opposables.....</i>	<i>23</i>
<i>Recommandations.....</i>	<i>24</i>
<i>Protections individuelles.....</i>	<i>24</i>
<i>Mesures de précaution durant la procédure de nettoyage.....</i>	<i>26</i>
Aération/ventilation du caisson.....	26
Combustible.....	27
Procédés d'humidification.....	27
<i>Spécificités de la surveillance médicale du personnel exposé.....</i>	<i>28</i>
<i>Extrapolation des résultats au déblai en opération.....</i>	<i>30</i>
<i>Synthèse des recommandations.....</i>	<i>32</i>
CONCLUSION.....	33
BIBLIOGRAPHIE.....	34
GLOSSAIRE.....	37
ANNEXE I – Figures et tableaux.....	38
ANNEXE II – Notices techniques.....	46
ANNEXE III – Illustrations des installations et des manœuvres.....	47

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 font 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'avec 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 terme 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 risque 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 cancérigènes dans les simulateurs d'incendies est quant à elle encore peu traitée dans la littérature.

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 caissons d'observation des phénomènes thermiques (ou *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 autant de sources d'expositions possibles pour le pompier que la production chimique locale est riche : gaz irritants (NO₂ et SO₂), gaz toxiques (cyanure d'hydrogène, monoxyde de carbone) et aérosols solides de toute gamme de diamètre, 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 (13). 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 qui suit, l'opération de déblayage des résidus des différents combustibles qui ont alimenté le foyer par les formateurs pompiers. Les formateurs intervenant lors de cette étape allègent plusieurs plaintes fonctionnelles dans les suites de ces opérations : suie intra-narinaire, 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 (14) mais aussi toutes voies confondues, avec des données de plus en plus nombreuses en terme de suivi biologique (15). 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 9 principes généraux de la prévention cités aux articles L4121-2 et L4121-3 du code du travail.

Les 9 principes généraux de la prévention
1 – Éviter les risques
2 – Évaluer les risques
3 – Combattre les risques à la source
4 – Adapter le travail à l'homme
5 – Tenir compte de l'évolution de la technique
6 – Remplacer ce qui est dangereux par ce qui ne l'est pas ou ce qui l'est moins
7 – Planifier la prévention
8 – Prendre des mesures de protection collective
9 – Donner des instructions appropriées.

Objectifs de l'étude et critères d'évaluation

L'objectif principal de l'étude est d'évaluer l'exposition des sapeurs-pompiers au risque 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 risque chimique pour ces intervenants.

MATÉRIEL ET MÉTHODE

La démarche expérimentale a été élaborée en concertation avec le Laboratoire d'Aérodologie de Toulouse, 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 : 12m192 de long, 2m438 de large et 2m591 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.

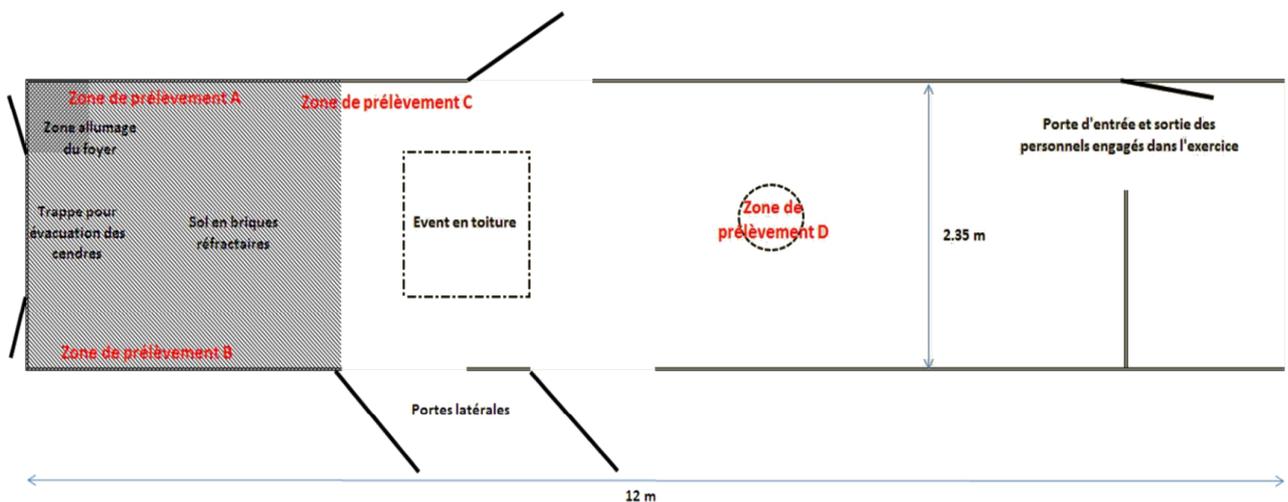


Fig 1 : Schéma du COEPT du SDIS de Rodez

L'opération dure environ 20 minutes. Elle comprends 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

volatils 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 particulaires

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 $10\mu\text{m}$ sont filtrées par le système pileaire vestibulaire puis par l'épithélium alvéolaire des cornets nasaux. Les particules intermédiaires, d'un diamètre de 3 à $10\mu\text{m}$, 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 $2,5\mu\text{m}$, atteignent la toute distalité de l'arbre bronchique et sont susceptibles de passer dans la circulation systémique via l'interface alvéolaire.

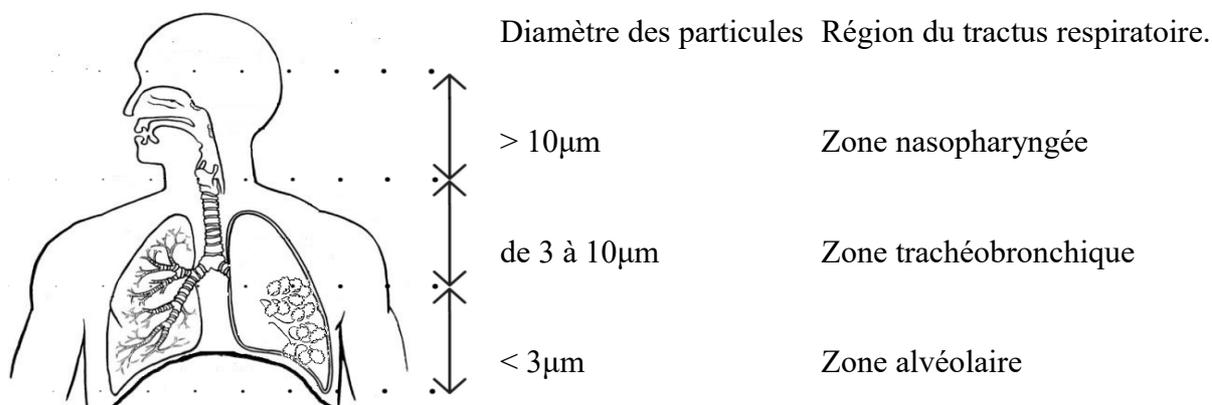


Fig. 2 : Pénétration du tractus respiratoire par les particules en fonction de leur diamètre. (16)
Dans le cadre de l'exposition au travail, on peut approximer la fraction de particules

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 $1\ 000\ \text{kg.m}^{-3}$.

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 (17).

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.

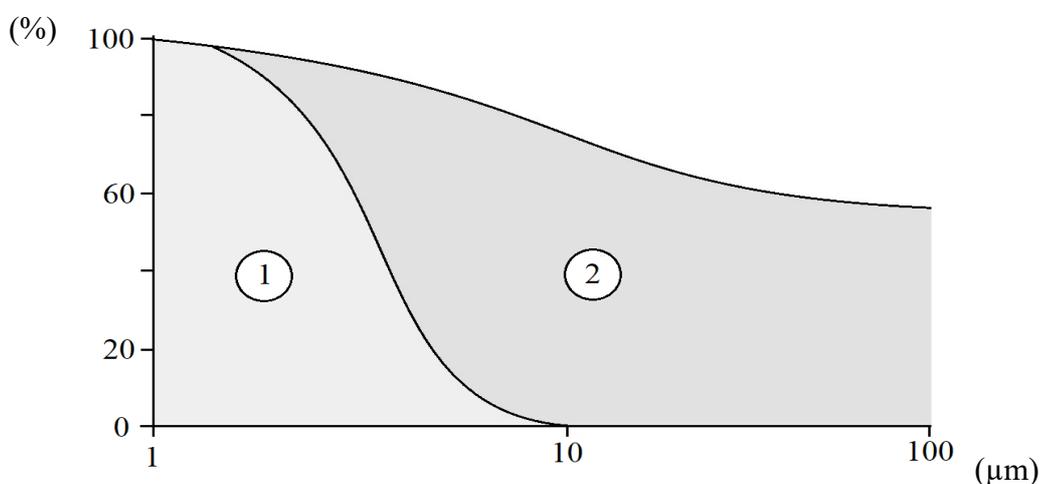


Fig. 3 : Proportion recueillie (%) des particules totales en fonction du diamètre aérodynamique (µm). Les fractions conventionnelles sont représentées par les zones que délimitent les courbes.
 ①: Alvéolaire, ①+ ②: Inhalable.

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 méthodes d'échantillonnage, fixes ou individuelles destinées 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
- CIP-10
- PEM IP10-A / Échantillonneur SKC
- Dorr-Oliver
- Simpeds

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 risque chimique particulier alors que la phase gazeuse est porteuse de davantage d'éléments chimiques. 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 l'instrument de mesure de la qualité de l'air intérieur Q-TRAK 7575.

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

Une mesure des concentrations d'aldéhydes (formaldéhyde et acétaldéhyde) a été effectuée par chromatographie liquide et détection UV des supports de collecte.

RÉSULTATS

Poussières réputées sans effet spécifique

Gravimétrie

La loi prévoit une limitation de la concentration moyenne en poussières totales et alvéolaires de l'atmosphère inhalée par un travailleur, à respectivement 10 et 5 milligrammes par mètre cube d'air, évaluée sur une période de huit heures (18). 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 résumées 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 plus émettrices de particules. 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 de taille, sur 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. On peut 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 de mise en suspension de poussières minime. On peut également observer 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. On y observe une décroissance du nombre de particules en fonction de leur taille. 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 : 519,338 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 suit 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 plus bas 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. On note une discordance des résultats entre 5.512 et 5.517, avec une diminution paradoxale des concentrations particulaires toutes gammes comprises sur le diagramme du LOAC, du fait d'un problème de saturation connu (19), pour les concentrations particulaires supérieures à 10 éléments/ cm^3 , qu'illustre la figure 8 en annexe.

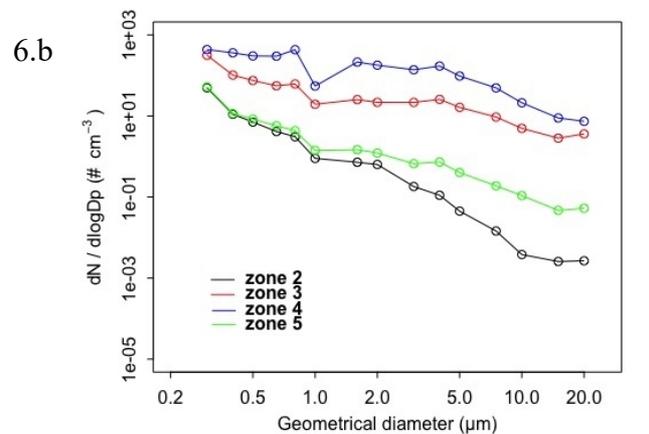
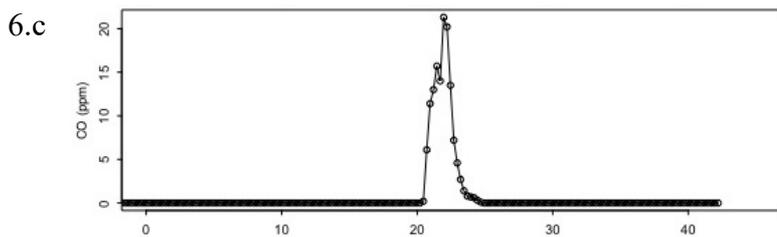
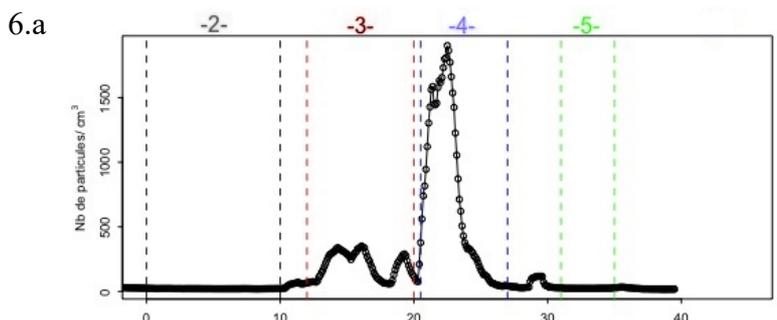
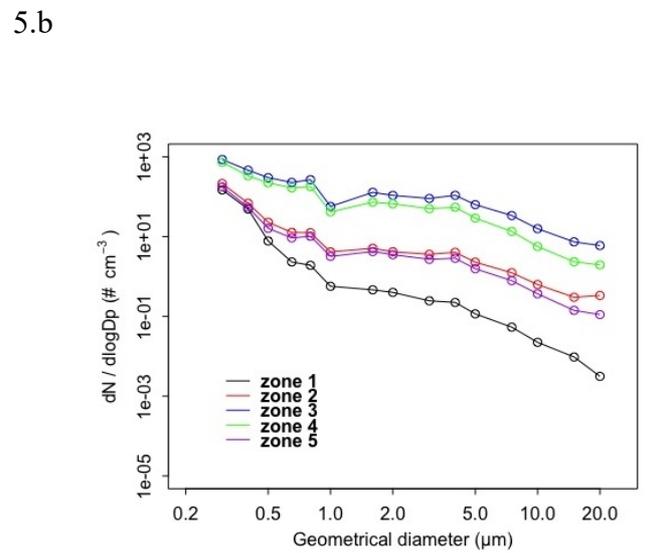
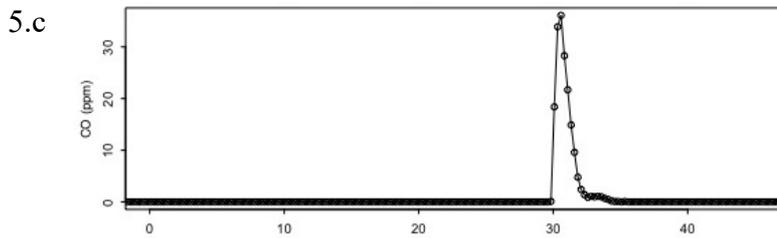
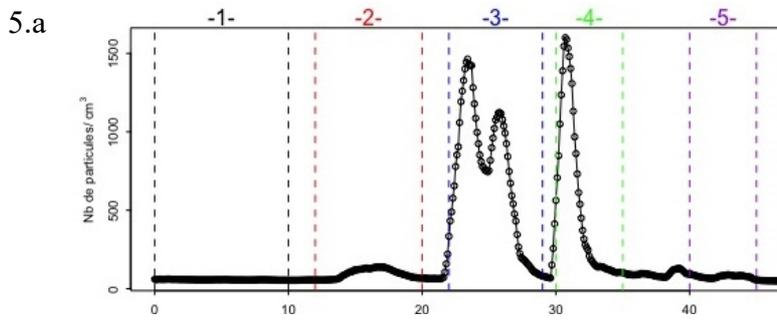
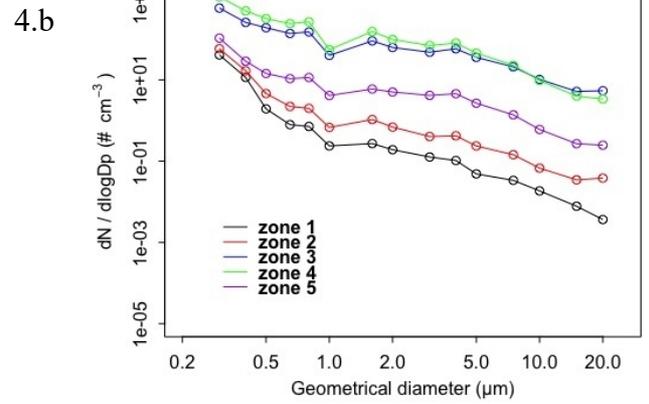
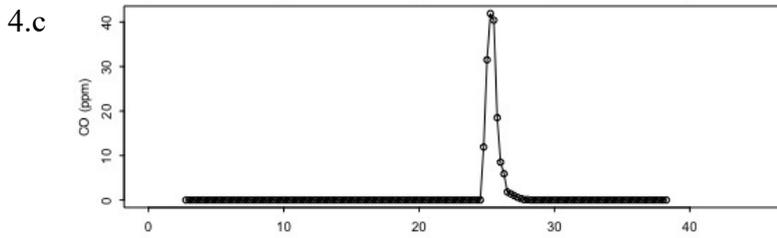
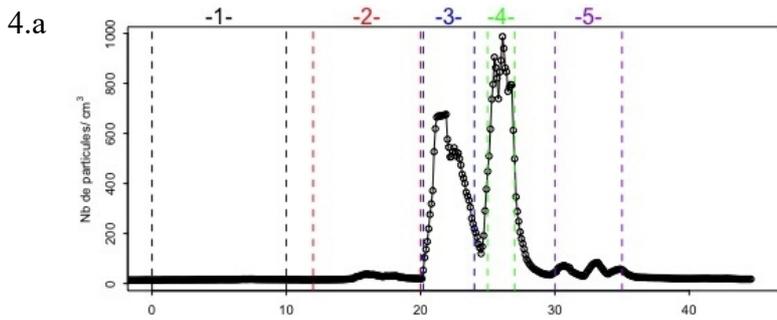


Fig. 4, 5, 6 : figures 4 : jour 1 ; figures 5 : jour 2 ; figures 6 : jour 3.
 figures 4a, 5a, 6a : concentrations de particules en fonction du temps,
 figures 4b, 5b, 6b : profils granulométriques, figures 4c, 5c, 6c : concentrations de CO

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 incendies 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) (20), réalisant la classique « courbe en V » des courbes de dépôt d'aérosol en fonction de leur diamètre. D'ailleurs, à la fois 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 ventilées 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) est la fraction « graphitisée » hautement polymérisée et chimiquement inerte, contenant très peu d'hétéroatomes (tels que O, H, N).
- Le carbone organique (OC) regroupant l'ensemble des composés organiques fonctionnalisés.

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 (21).

Le ratio entre ces deux fractions (OC/CE) est un indicateur classique et préconisé de la qualité de l'air (22) 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 Réno, Nevada), selon la méthode IMPROVE au sein du laboratoire d'aérogologie.

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 prélèvements 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 (23), (24).

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 (24). 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.

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 monoxyde de carbone 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 on pouvait s'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 plusieurs 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 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 : naphthalène 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 naphthalène, 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 $1,5 \text{ mg.m}^{-3}$.
- Des HAP : le naphthalène entre $1,5$ et 5 mg.m^{-3} , acénaphthylène et anthracène entre $0,25$ et $1,5 \text{ mg.m}^{-3}$,
- Du phénol entre $0,25$ et $1,5 \text{ mg.m}^{-3}$
- 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 dosage durant l'opération de balayage sont retranscrits dans le tableau 7. Seul le formaldéhyde a pu être identifié.

Les résultats du dosage durant l'opération de brûlage sont retranscrits au tableau 8. Les concentrations de formaldéhyde sont retrouvées à des concentrations plus importantes, environ cent fois plus concentrées ($1,49 \text{ mg.m}^{-3}$) que pendant la phase de déblai. Malgré une volatilité moindre⁴ nous retrouvons la présence d'acétaldéhyde ($2,25 \text{ mg.m}^{-3}$), 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

Limites de l'étude

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

La convention sous-estime habituellement la fraction inhalable des plus grosses particules pour une personne faisant face au vent, notamment si les vitesses du vent excèdent 4 m/s. (14,4km/h) (25). 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 (17), 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 (26). 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 (27), (28).

Le fait de traiter une problématique recentrée et circonscrite constitue plutôt une force de ce travail. Néanmoins, nous pourrions voir dans le parti-pris assumé, de n'investiguer que la voie respiratoire de l'exposition chimique, une certaine limite. 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 pouvions 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 (29) pour la fraction PM2.5, 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 µg.m⁻³ 5, 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 mesure 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 (30).

Forces de l'étude

Il s'agit d'un travail original, en ce que l'exposition au risque 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 l'aérosol particulaire.

L'intervention du laboratoire d'aérodologie 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.

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

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.

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* » (31).

Ces outils pour la prévention du risque chimique sont fixés par voies réglementaires 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 (32).

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

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	-

Tableau 9 : Valeurs limites d'exposition réglementaires des substances étudiées

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'erreur 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 cancérogènes, 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 des 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 caractère 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 (33)) 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 dûs à des pics d'exposition.

Notons que la valeur d'exposition 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 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 et ne fasse l'objet d'un texte réglementaire.

Les mesures individuelles d'exposition du travailleur sont effectuées dans la zone respiratoire⁶. Il est à noter que la description de la zone respiratoire est inapplicable

6 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)

lorsqu'un équipement de protection est utilisé et que les VLEP ne tiennent pas compte du port de ces équipements.

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} ⁷. Des effets cliniques ont été décrits pour un seuil

⁷ 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).

inférieur à la VLEP actuelle, entre 600 ppm et 1,000 ppm de CO₂. Il s'agit d'effets cognitifs et plus précisément d'une baisse de performance de la prise de décision (34).

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 loin 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 on pouvait 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 200% 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.

b

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 type⁸. 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 (35). 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 (36).

Néanmoins, nous avons vu que le risque par 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 dans la fraction carbonée 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 compris dans la gamme pour laquelle 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 (37). 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 (15). 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,

⁸ Aérosol composé de particules de NaCl de diamètre médian 0,6 μm et d'huile de paraffine de diamètre médian 0,4 μm .

le bavolet de nuque, le sur-pantalon et les rangers.

La chaîne d'hygiène des équipements de protection est un élément clef de l'exposition au risque 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'hygiènes 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 (20). Plus on se rapproche de l'opération de combustion, plus la phase gazeuse est riche en éléments chimiques difficilement filtrables par les masques de protections 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 à petite 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 (15). 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 de pin ou sapin massif.

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 proscriera 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 (38) 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 (39). 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 respiratoires filtrants (FFP2). L'utilisation de ce dispositif répond d'abord en caisson 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 (40) 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 risque 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 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 avéré de mélanome chez les pompiers. Il pourrait être intéressant d'intégrer une stratégie de diagnostic spécifique précoce du mélanome dans la consultation d'aptitude (41).

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 réglementaire⁹. 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

⁹ Arrêté du 30 janvier 2012 relatif au modèle de fiche prévu à l'article L4121-3-1 du code du travail.

benzène ou le toluène, sont classées CMR¹⁰ et l'exposition à ces substances donne lieu à des 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 (42). Une surveillance clinique particulière aurait certainement peu d'intérêt pour les doses auxquelles le personnel semble être exposé.

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.

Compte-tenu du lien établi entre l'exposition aux particules ultrafines (PM2.5) et le risque cardio-vasculaire (43), la mise en place d'un examen fonctionnel cardiovasculaire (électrocardiogramme d'effort) en fonction du risque cardiovasculaire de l'agent paraît judicieuse.

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

¹⁰ Substance classée cancérigène, mutagène et reprotoxique par l'office d'enregistrement, d'évaluation et d'autorisation des produits chimiques.

l'attaque. La persistance et la remobilisation des produits de dégradation thermique en font une phase à fort risque d'exposition, faisant préconiser le port d'une tenue respiratoire isolante (44). 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 (45). 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 modeste¹¹. 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 (46).

¹¹ La seule substance pour laquelle il existe un marqueur biologique d'exposition réglementaire est le plomb.

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 d'exposition encourus.

CONCLUSION

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

Au vu des résultats généraux de la campagne de mesures, et 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 matériel et organisationnel synthétisés en une liste de recommandations. La poursuite d'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, est souhaitable, afin de concevoir et de promouvoir les solutions de prévention.

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

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.

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.

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;oemed-2015.
5. Tsai RJ, Luckhaupt SE, Schumacher P, Cress RD, Deapen DM, Calvert GM. Risk of cancer among firefighters in California, 1988–2007. *Am J Ind Med.* 2015;58(7):715–729.
6. Pukkala E, Martinsen JI, Weiderpass E, Kjaerheim K, Lynge E, Tryggvadottir L, et al. 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, Sobeih T, Barriera-Viruet H, et al. 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 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. Stalnaker CK. Characterization of firefighter exposures during fire overhaul. *Prof Saf.* 1 mars 2001;46(3):37.
14. 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.

15. 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.
16. Oberdörster G, Oberdörster E, Oberdörster J. Nanotoxicology: an emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. *Environ Health Perspect.* 2005;113(7):823.
17. 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.
18. République Française. R4222-10. Code du travail. Sect. 3 : Locaux à pollution spécifique, Décret n°2008-244- (V) mars 7, 2008.
19. 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.
20. Nerisson P. Modélisation du transfert des aérosols dans un local ventilé [PhD Thesis]. Institut National Polytechnique de Toulouse; 2009.
21. 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).
22. 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.
23. Dron J. Analyse fonctionnelle par spectrométrie de masse tandem: application aux aérosols organiques atmosphériques [PhD Thesis]. Université de Provence-Aix-Marseille I; 2008.
24. 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.
25. Lafon D, Blanchard O, Nonat A. La métrologie des empoussiérages. 1996.
26. INRS. Prélèvement des aérosols par le dispositif CIP 10 - Fiche Métropol. 2015 oct.
27. 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.
28. 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.
29. FD CEN/TR 15230 - Atmosphères de lieux de travail - Guide pour l'échantillonnage des fractions d'aérosols inhalables, thoraciques et alvéolaires. 2005.
30. INRS. Interprétation statistique des résultats de mesure - Fiche Métropol Version 2. 2016.

31. AISS I. Valeurs limites d'exposition pour la prévention des risques chimiques. 2016 nov. Report No.: ED6254.
32. Décret n° 2009-1570 du 15 décembre 2009 relatif au contrôle du risque chimique sur les lieux de travail. 2009-1570 déc 15, 2009.
33. 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 | Legifrance
34. 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.
35. Huré P, Guimon M. Les appareils de protection respiratoire: choix et utilisation. INRS; 2002.
36. NF EN 529 Appareils de protection respiratoire - Recommandations pour le choix, l'utilisation, l'entretien et la maintenance - Guide. 2006.
37. Service public. Les sapeurs-pompiers au bord de l'asphyxie. *L'Humanité.* 2017
38. 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.
39. République Française. R4222-12. Code du travail. Sect. 3 : Locaux à pollution spécifique, Décret n°2008-244- (V) mars 7, 2008.
40. 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.
41. Stratégie de diagnostic précoce du mélanome - Recommandations en santé publique. Rapport d'évaluation. HAS - Service évaluation médico-économique et santé publique; 2006 oct.
42. Marcant C, Maurice S, Moesch C. Appréhension du risque CMR chez les sapeurs-pompiers. Aix-en-Provence: École Nationale Supérieure des Officiers Sapeurs-Pompiers (ENSOSP); 2011. 1 vol (41 p. annexes).
43. Nalbone G. Pollution par les particules atmosphériques fines et ultrafines et risque cardiovasculaire. *Médecine Longévité.* 1 mars 2010;2(1):22-39.
44. Guide nationale de référence : Appareils Respiratoires Isolants. La direction de la défense et la sécurité civile, Sous-direction des services de secours et des sapeurs-pompiers; 1999 avr p. 5.
45. 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.
46. 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 hydrocarbure plan possédant $4n + 2$ électrons délocalisables dans un système cyclique (où n est un entier naturel quelconque).

ANNEXE I – Figures et tableaux

	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

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

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

Tableau 2 : Concentration massique mesurées par analyse gravimétrique des supports de collecte (filtre ou coupelle de CIP 10)

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

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

Tableau 3 : Concentration massique mesurées par analyse gravimétrique des supports de collecte (filtre ou coupelle de CIP 10)

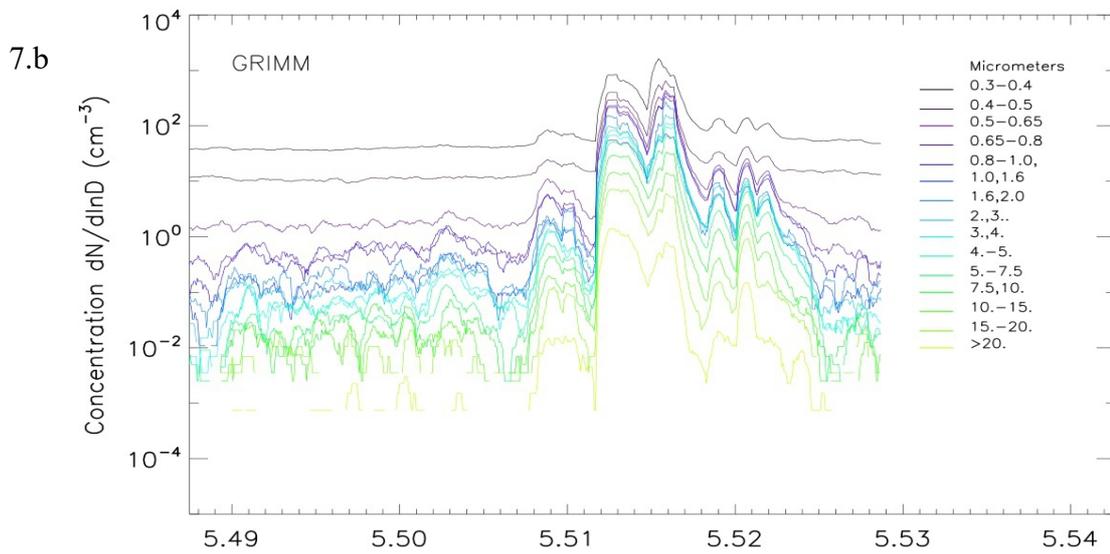
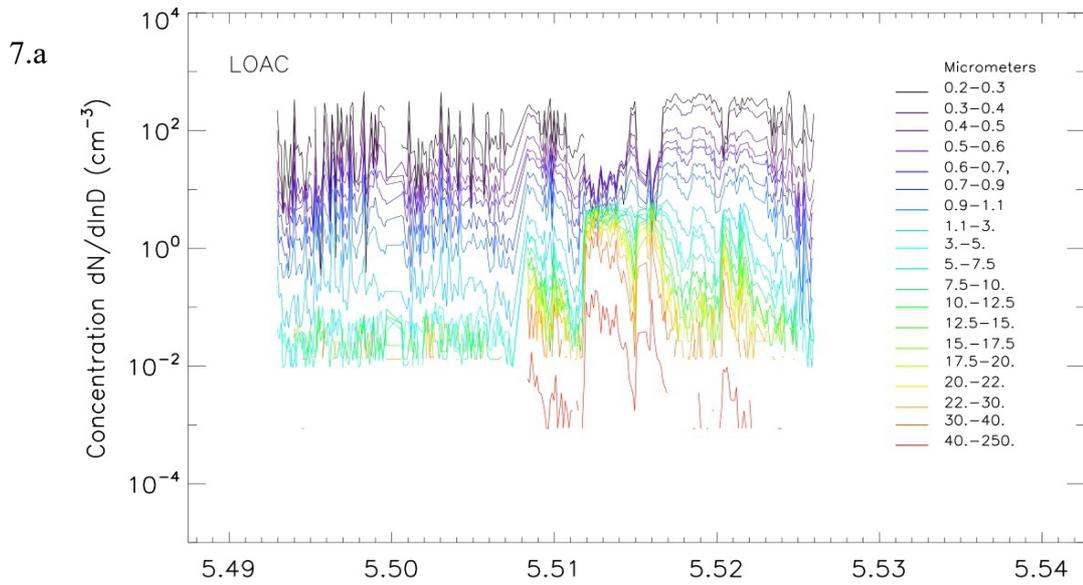


Fig 7 : Comparaison des profils granulométriques de l'aérosol.
7.a : LOAC ; 7.b : GRIMM

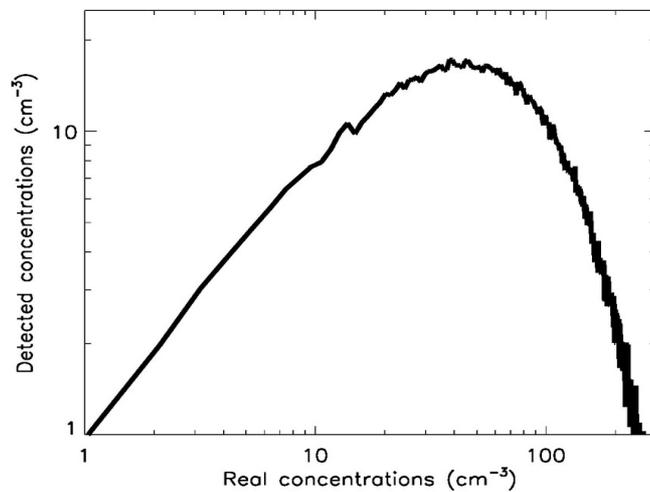
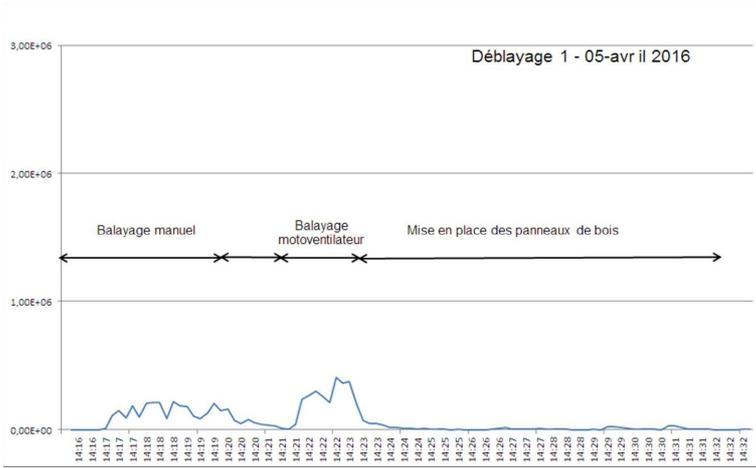
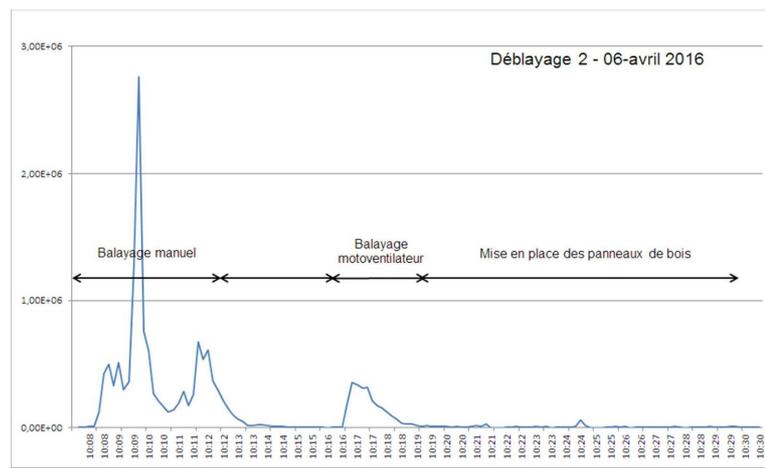


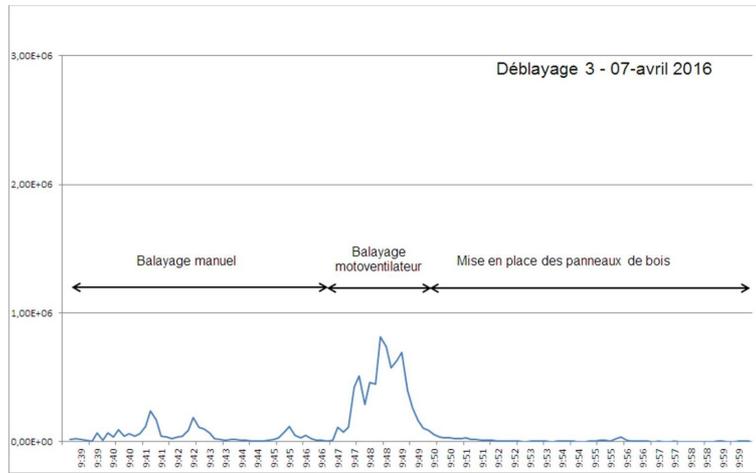
Fig 8 : Modélisation de Monte-Carlo pour le comptage de particules de diamètre supérieur à $1\mu\text{m}$.



9.a



9.b



9.c

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

Dispositif de prélèvement	Fraction conventionnelle	Nature du prélèvement	Type de support	Volume prélevé (L)	Masse prélevée (mg)	[Carbone] (mg.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

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

	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

Tableau 5 : Charge carbonée et rapport OC/CE de la fraction PM2.5 recueillie sur équipement individuel

	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

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

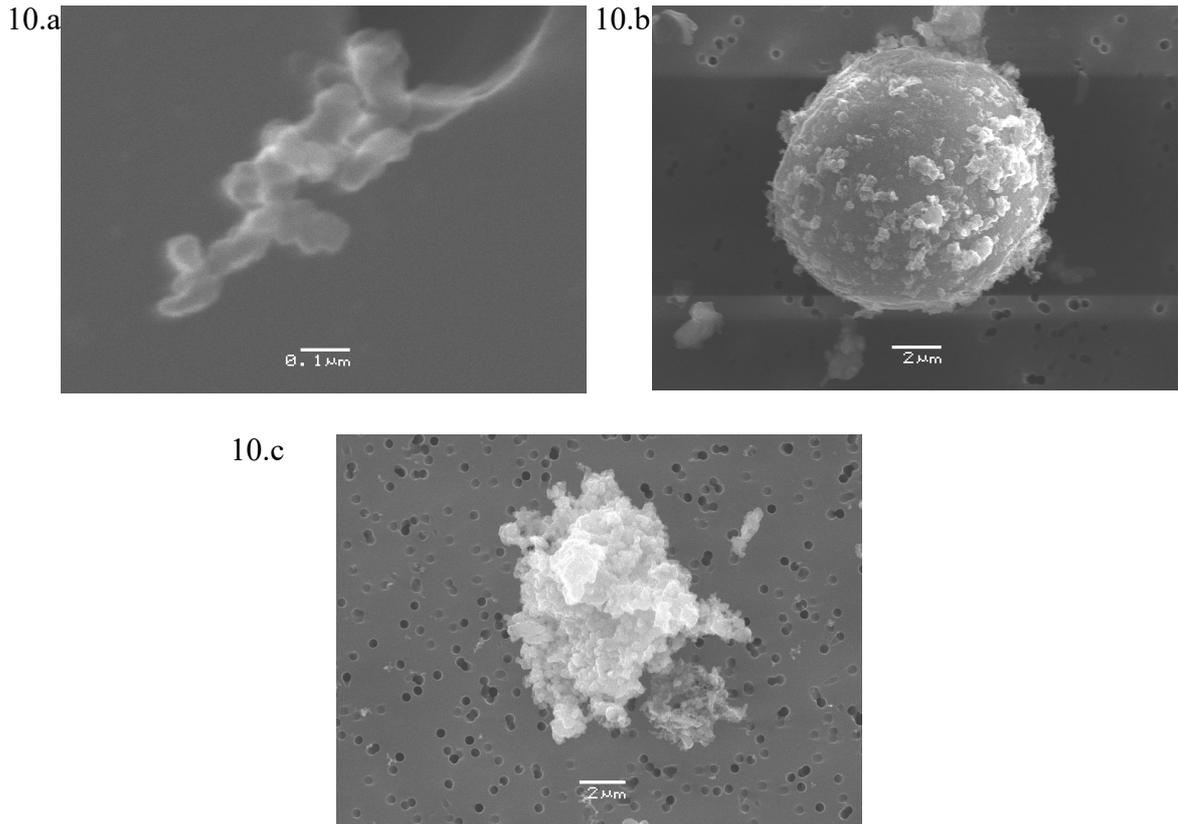


Fig. 10.a,b,c : Microscopie électronique à balayage. 9A : Suies avec quelques traces de sphérules de carbone ; 9b et 9c : cendres contenant des sels de silicium et de calcium, et oxydes métalliques.

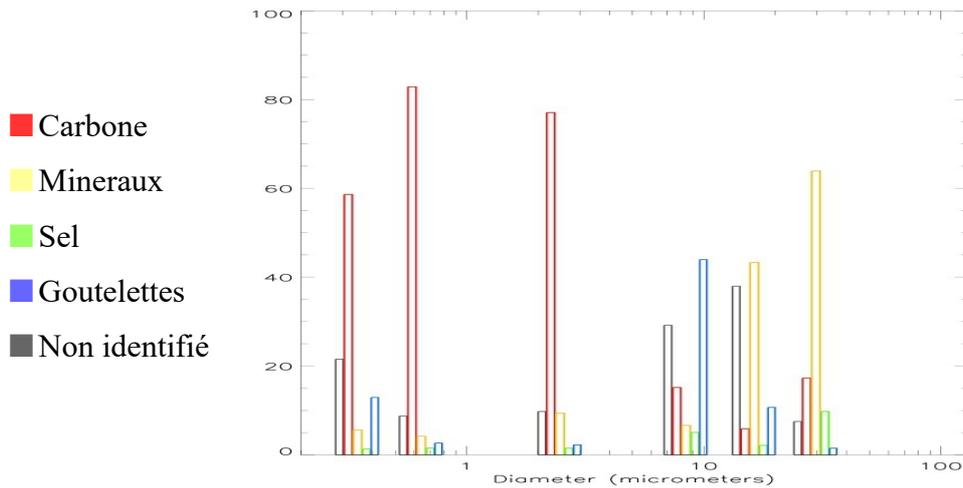


Figure 11 : Spéciation de la fraction totale de l'aérosol par LOAC

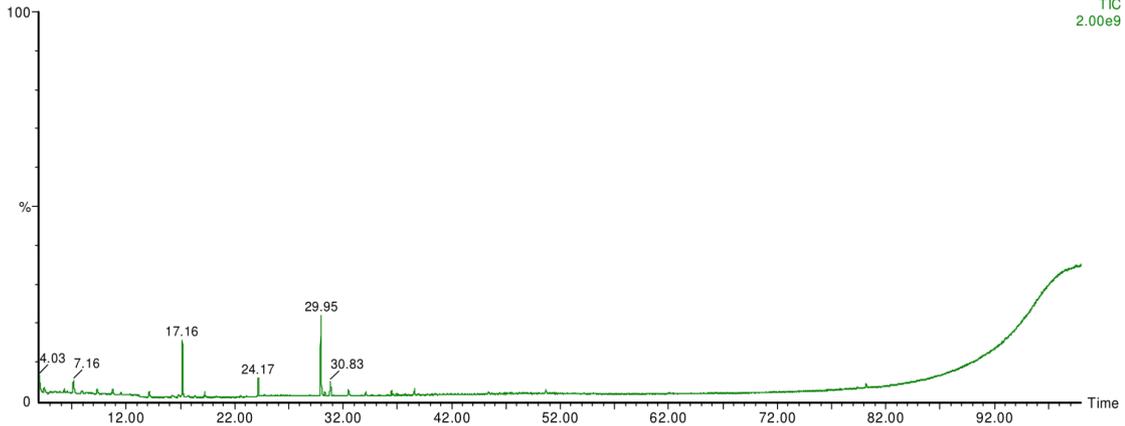


Fig 12 : Identification des COV par chromatogramme obtenu par prélèvement après l'opération de brûlage

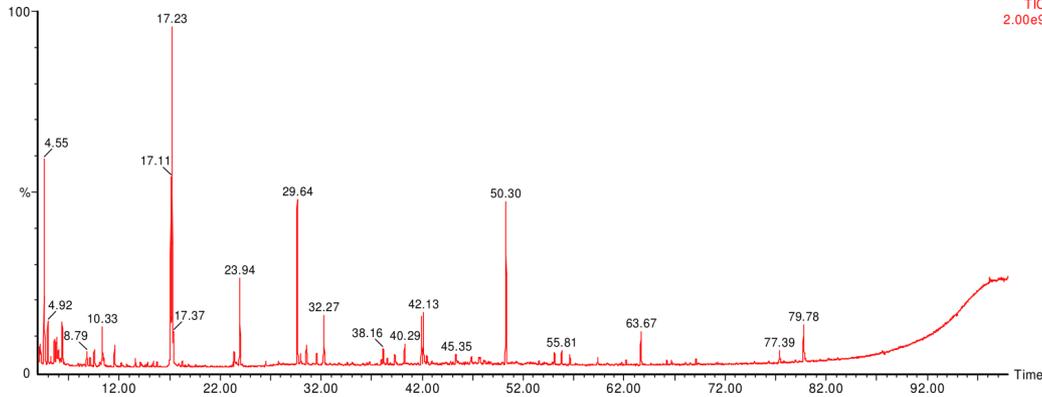


Fig 13 : Identification des COV par chromatogramme obtenu par prélèvement pendant l'opération de brûlage

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

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

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

Tableau 8 : Concentrations en aldéhydes mesurées pendant l'opération de déblai

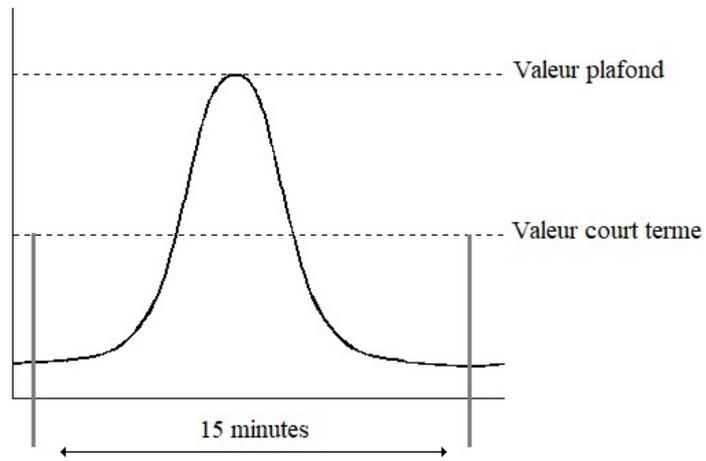


Fig. 14 : Exposition à une substance en fonction du temps.
Illustration d'un pic par rapport aux valeurs plafonds et court terme.

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

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

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