



Université de Lille

Faculté D'Ingénierie et Management de la Santé (ILIS)

MASTER INGENIERIE DE LA SANTE 2^{ème} ANNEE
PARCOURS : QUALITE, SANTE, ENVIRONNEMENT ET TOXICOLOGIE

ENZO AVVENIA

****MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDE****

PROBLÉMATIQUE: Amélioration de l'évaluation des risques liés à l'exposition professionnelle aux fumées d'incendies.

Sous la direction du Professeur Guillaume GARÇON

DATE DE LA SOUTENANCE : Le jeudi 3 octobre 2019



COMPOSITION DU JURY :

Président du jury : M. DENAYER Franck-Olivier (Doyen de la Faculté ILIS)

Directeur de mémoire : M. GARÇON Guillaume (Professeur en toxicologie)

3^{ème} membre de jury : M. CLAREBOUT Christophe (Capitaine au SDIS59)

Faculté Ingénierie et Management de la Santé - ILIS
42 rue Ambroise Paré
59120 LOOS

Remerciements

Je souhaite en premier lieu remercier l'ensemble de l'équipe pédagogique de l'ILIS de m'avoir permis de réaliser cette formation d'exception. Elle représente une réelle valeur ajoutée à mon parcours professionnel.

Je voudrais dans un deuxième temps remercier, mon directeur de mémoire, le professeur Guillaume GARÇON, pour son aide, ses conseils et ses critiques qui m'ont permis de prendre du plaisir et d'enrichir mes compétences techniques et mentales.

Je tiens également à exprimer toute ma reconnaissance aux personnes qui ont pris le temps de me recevoir et de m'écouter afin de rendre ce travail possible : le Lieutenant-Colonel DUBOIS, le Lieutenant BLONDEL-HERMANT, le Lieutenant PAGNACCO, l'Adjudant-Chef LECLAIR, l'Adjudant DE-JESUS ainsi que toutes les personnes qui ont participé à mon questionnaire.

Je remercie mon grand frère Gianni. Sans lui, ce mémoire n'aurait probablement jamais existé.

Un énorme merci à Florian TORPEDO, Jonathan PITCHER, et Aurélien MARLIER pour leur bonne humeur et pour avoir su égayer mes longs week-ends d'écriture.

Je souhaite remercier du fond du cœur mon père, ma mère et mes petits frères qui tout au long de mon cursus m'ont toujours soutenu, encouragé et aidé.

Je désire remercier spécialement ma femme Chloé, pour ses heures innombrables passées à me supporter. Notamment pour sa confiance, ses précieux conseils, son soutien sans failles, son expertise dans la détection de coquilles et sa bonne cuisine.

Enfin, je tiens également à dédier ce mémoire à l'ensemble des sapeurs-pompiers de France, ma famille ainsi que les personnes qui n'ont pas eu le temps suffisant de me voir terminer mes études..

«Gli ostacoli non mi fermano. Ogni ostacolo si sottomette alla rigida determinazione. Chi guarda fisso verso le stelle non cambia idea» Leonardo Da Vinci

Table des matières

INTRODUCTION	1
I. Généralités.....	3
A. Naissance	3
B. Propagation	4
C. Lutte.....	5
II. Les différents types de feu	5
A. Feu de biomasse	6
B. Feu Urbain	11
C. Feux de locaux de stockage d'entreprise chimique	17
III. Dangérosité des polluants	21
A. Choix des polluants.....	21
B. Particules en suspension 2.5 et 10	21
C. Hydrocarbures aromatiques polycycliques	23
D. L'acroléine	27
E. Benzène, Toluène, Ethylbenzène et Xylène (Ortho/méta/para).....	28
F. Retardateur de flammes.....	32
IV. Personnels exposés	36
A. Équipements de Protection	36
B. Limites des EPI	37
C. Modalités d'exposition	39
V. Méthodologie.....	41
A. Problématique	41
B. Méthodologie	41
C. Analyse des résultats	43
D. Interprétation des résultats.....	49
VI. Conclusion et perspectives	56
Bibliographie	59
ANNEXES	64

Table des figures

Figure 1: Tétrahédre du feu (Avvenia, 2019)	3
Figure 2: Représentation des phénomènes thermiques (Vershaere , 2018).....	4
Figure 3: Plan des maisons utilisées pour les scénarios d'incendie.....	14
Figure 4: Schéma salle ISO 9705 (ISO, 1993).....	19
Figure 5: Photographie sous UV de face avant exposition (RTI international, 2015)	38
Figure 6: Photographie sous UV de face après exposition (RTI international, 2015).....	38
Figure 7: Photographie sous UV du côté droit après exposition (RTI international, 2015).	38
Figure 8: Photographie sous UV du côté droit avant exposition (RTI international, 2015).	38
Figure 9: Histogramme de la répartition de l'âge des répondants.....	43
Figure 10: Diagrammes circulaires du pourcentage des réponses reçues à la question n°2	44
Figure 11: Fréquences cumulées des polluants principaux cités.....	45
Figure 12 : Fréquence cumulée des impacts potentiels sur la santé aux fumées cités par les participants	46

Table des tableaux

Tableau 1: Substances principales nocives dans un feu de forêt (Mennen & van Belle, 2007)	10
Tableau 2: Principaux produits émis lors de la dégradation thermique en fonction des familles de plastiques.....	12
Tableau 3: Identification des scénarios d'incendie de maison	14
Tableau 4: COV et COSV les plus cancérogènes détectés dans la plupart des expériences d'Hewitt et coll.....	14
Tableau 5: Classement des agents en fonction de la preuve d'indication des 3 critères pris en compte par le CIRC	16
Tableau 6: Classification des BTEX selon les informations du CIRC	28
Tableau 7: Résumé des effets des polluants choisis	34
Tableau 8: Taux de Participation et d'exploitation du questionnaire	43
Tableau 9: Répartition des réponses de la question n°2	44
Tableau 10: Répartition des personnes sensibilisées aux polluants présents dans les fumées.....	44
Tableau 11: Répartition des personnes en fonction de leur connaissance sur l'impact sanitaire des fumées.....	45
Tableau 12: Représentation condensée des questions rapportant à la perception du risque	46

GLOSSAIRE

- ❖ **ADN** : Acide désoxyribonucléique
- ❖ **ANSES** : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
- ❖ **ARI** : Appareil respiratoire isolant
- ❖ **ATSDR** : Agence des substances toxiques et du registre des maladies (*notée « ATSDR » en anglais pour « Agency for Toxic Substances and Disease Registry »*)
- ❖ **AVC** : Accident vasculaire cérébral
- ❖ **BPCO** : Bronchopneumopathie chronique obstructive
- ❖ **BSPP** : Brigade de sapeurs-pompiers de Paris
- ❖ **BTEX** : Benzène – Toluène – Ethylbenzène – Xylène
- ❖ **C₂N₂** : Cyanogène
- ❖ **CH₄** : Méthane
- ❖ **CIRC (IARC en anglais)** : Centre international de recherche sur le cancer (*notée « IARC » en anglais pour « International Agency for Research on Cancer »*)
- ❖ **CLP** : Règlement relatif à la classification, à l'étiquetage et à l'emballage (*notée « CLP » en anglais pour « Classification, labelling, packaging »*)
- ❖ **CMR** : Cancérogène, mutagène, reprotoxique
- ❖ **CNBA** : Acide 4-chloro-3-nitrobenzoïque
- ❖ **CNESST** : Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail basée au Canada
- ❖ **CO** : Monoxyde de carbone
- ❖ **CO₂** : Dioxyde de carbone
- ❖ **COSV** : Composé organique semi-volatil
- ❖ **COV** : Composé organique volatil
- ❖ **CTIF** : Centre de statistiques sur les incendies (*notée « CTIF » en anglais pour « Center for Fire Statistics »*)
- ❖ **DGSCGC** : Direction générale de la sécurité civile et de la gestion des crises
- ❖ **ECHA** : Agence européenne des produits chimiques (*notée « ECHA » en anglais pour « European Chemicals Agency »*)
- ❖ **EFSA** : Autorité européenne de sécurité des aliments (*notée « EFSA » en anglais pour « European Food Safety Authority »*)
- ❖ **EPI** : Équipement(s) de protection individuelle

- ❖ **ERO** : Espèces réactives de l'oxygène
- ❖ **FAST** : Test de dépistage des aérosols par fluorescence (*notée « FAST » en anglais pour « Fluorescent Aerosol Screening Test »*)
- ❖ **FT** : Fiche technique
- ❖ **G6PD** : Glucose-6-Phosphate Déshydrogénase (G6PD) est une enzyme indispensable à la survie des globules rouges
- ❖ **GC-MS** : Chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (*notée « GC-MS » en anglais pour « Gas chromatography-mass spectrometry »*)
- ❖ **GIS** : Groupement d'incendie et de secours
- ❖ **HAP** : Hydrocarbures aromatiques polycycliques
- ❖ **HBCD** : Hexabromocyclododécane
- ❖ **HBr** : Bromure d'hydrogène
- ❖ **HCl** : Chlorure d'hydrogène
- ❖ **HCN** : Cyanure d'hydrogène
- ❖ **HHS** : Département de la Santé et des Services sociaux des États-Unis (*notée « HHS » en anglais pour « Department of health and human services »*)
- ❖ **IAFF** : L'association internationale des pompiers (*notée « IAFF » en anglais pour « International association of firefighters »*)
- ❖ **INERIS** : Institut national de l'environnement industriel et des risques
- ❖ **ISO** : Organisation internationale de normalisation
- ❖ **MGO** : Marche générale des opérations
- ❖ **N2O**: Protoxyde d'azote
- ❖ **NH₄**: Ammonium
- ❖ **NIOSH**: National Institute for Occupational Safety and Health
- ❖ **NO_x** : oxydes d'azote
- ❖ **Ny66** : Nylon 66
- ❖ **OMS** : Organisation mondiale de la santé
- ❖ **OSHA**: Occupational Safety and Health
- ❖ **PBDE**: Polybromodiphényléthers
- ❖ **PCB**: Polychlorobiphényles
- ❖ **PFIB** : Perfluoroisobutene
- ❖ **PM** : Particules en suspension (*notées « PM » en anglais pour « Particulate matter »*)
- ❖ **PP** : Polypropylène
- ❖ **RTI** : Institut triangle de recherche (*notée « RTI » en anglais pour « Research triangle Institute »*)

- ❖ **SDIS** : Service départemental d'incendie et de secours
- ❖ **SO_x** : Oxydes de soufre
- ❖ **TBBPA** : Tetrabromobisphenol A
- ❖ **TCDD** : 2,3,7,8-Tétrachlorodibenzo-p-dioxine, est un type de dioxine appelée aussi « dioxine de Seveso »
- ❖ **TMTM** : Monosulfure de tétraméthylthiurame
- ❖ **(US)-EPA** : Agence américaine de protection de l'environnement
(notée en anglais « US-EPA » pour « United States Environmental Protection Agency »)
- ❖ **VLCT** : Valeur limite de courte durée établie pour 15 minutes
- ❖ **VLEP** : Valeur limite d'exposition professionnelle établie pour 8 heures
- ❖ **VME** : Valeur moyenne d'exposition
- ❖ **vPvB** : Substance préoccupante très persistante et très bioaccumulable
(notée « vPvB » en anglais pour « very persistent and very bioaccumulative »)

INTRODUCTION

Pendant une longue période, les fumées d'incendies furent négligées et surtout sous-estimées. Ce n'est qu'en 2010 que le centre international de recherche sur le cancer (CIRC) a publié dans sa monographie l'existence de preuves limitées d'une cancérogénicité associée à la profession de sapeur-pompier (IARC, 2010). De surcroît, une récente étude épidémiologique a mis en évidence que les sapeurs-pompiers avaient un risque considérablement accru de développer un certain nombre de cancers (cancers colorectaux, de la prostate, testiculaires, de la vessie, de la thyroïde et de la plèvre) par rapport à la population (Jaililian, et al., 2019), en dépit du fait qu'ils sont souvent reconnus pour adopter un mode de vie généralement sain, complété par une condition physique plus soutenue que le reste de la population. Néanmoins, le principal facteur séparant les sapeurs-pompiers des autres groupes est que les pompiers sont souvent exposés à des situations stressantes, dans lesquelles des polluants chimiques étrangers et inconnus sont présents (notamment dans les fumées d'incendies).

Par ailleurs, de nombreux polluants sont aujourd'hui présents dans ces fumées toxiques et sont qualifiés comme étant des substances cancérogènes certaines (IARC, 2010). D'autres sont de plus en plus préoccupants : de nombreux additifs comme les retardateurs de flammes utilisés dans la fabrication de meubles de décoration sont désormais de plus en plus surveillés par les autorités sanitaires.

A cet égard, aujourd'hui encore, le nombre de polluants et la toxicologie sont sans cesse réévalués. Certaines personnes travaillant dans les centres de secours ne disposent pas de connaissances suffisantes sur l'impact sanitaire et environnemental que peuvent engendrer ces fumées, car la contamination est à la fois évidente mais aussi cachée par ce manque d'information scientifique. Beaucoup de questions restent sans réponse et l'ambiguïté entoure la manière dont les pompiers sont affectés par ces maladies. Pourtant, ces derniers portent lors d'interventions, des équipements de protection individuelle en plus de l'appareil respiratoire isolant.

D'autre part, il est important de souligner le phénomène planétaire observé depuis ces cinq dernières années : le changement climatique. Cette manifestation entraîne et va probablement entraîner un nombre d'incendies plus important et plus dangereux. Intrinsèquement, cela entraînera une exposition aux incendies et aux fumées toxiques par les professionnels du métier (Chartry, et al., 2010).

Par conséquent, la constante augmentation de nombreux polluants toxiques dans les fumées ainsi que la recrudescence de l'exposition future et l'augmentation de maladies nous amènent à nous interroger sur la problématique suivante :

Comment améliorer l'évaluation des risques liés à l'exposition professionnelle de ces fumées ?

Pour répondre à cette problématique et pour une compréhension optimale du sujet, seront dans un premier temps traitées les principales généralités du feu amenant à l'exposition des professionnels. Différents types de feu seront passés en revue afin d'établir les différences et les points communs des polluants émis. Par la suite, nous étudierons les effets chroniques de quelques polluants, dont certains sont spécifiques au type de feu présenté. Nous étudierons également les modalités d'exposition. Enfin, dans une seconde partie, nous analyserons les pratiques des professionnels au quotidien. Des axes de réflexion permettant de les améliorer seront proposés.

I. Généralités

A. Naissance

Pour faciliter la compréhension du sujet, il convient de définir ce qu'est un feu qui, s'il n'est pas maîtrisé, engendre des incendies pouvant parfois être mortels.

La majorité des personnes pense que pour pouvoir produire une flamme ou un feu, il ne faut rassembler que 3 éléments. A savoir : l'énergie d'activation, le combustible et le comburant. Ces 3 éléments forment ce qu'on appelle « le triangle du feu ».

Cependant, la combinaison de ces éléments donne lieu à une réaction chimique d'oxydation appelée : combustion.

Par définition, une réaction d'oxydation donne lieu à des échanges d'électrons. Ces réactions sont scientifiquement appelées des réactions d'oxydoréduction. Ces dernières sont omniprésentes dans l'environnement, dans une grande partie des procédés des industries chimiques, métallurgiques ... Par ailleurs elles sont très fréquentes en biologie. Par exemple, dans la chaîne respiratoire localisée dans la membrane interne des mitochondries, elles permettent d'assurer la transformation de molécules d'eau (H_2O) en dioxygène (O_2) chez les organismes aérobies (CF annexe n°1).

De fait, une autre composante vient s'ajouter à ce « triangle du feu » : les radicaux libres. Ensemble, ils forment ce qu'on appelle le « tétraèdre de feu » (figure n°1). Cette étape est nécessaire pour que la combustion s'entretienne et que l'on puisse parler d'incendie.

La disparition de l'un des quatre éléments de ce tétraèdre suffit à arrêter une combustion.

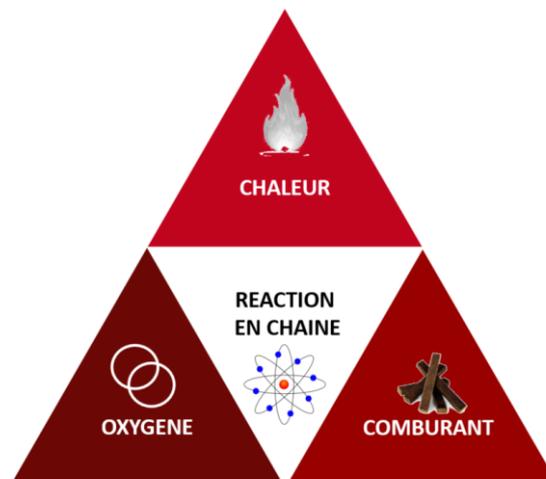


Figure 1: Tétraèdre du feu (Avvenia, 2019)

Pour aboutir à un incendie, il faut que la flamme produite se développe pour former dans un premier temps un feu qui se propage, puis un incendie.

B. Propagation

Le développement s'effectue par des transferts de chaleur de proche en proche et permet ainsi de propager la flamme en feu, puis le feu en incendie.

Il existe essentiellement trois types de transferts :

- ❖ La conduction : transfert de la chaleur ou de l'électricité d'un point à un corps, sous l'action d'une différence de température ou de potentiel électrique. (Brigade de sapeurs-pompiers de Paris, 2009)
- ❖ La convection : transfert de chaleur par mouvement vertical d'un fluide, ascendant ou descendant. (Brigade de sapeurs-pompiers de Paris, 2009)
- ❖ Le rayonnement thermique : transfert par processus d'émission ou de propagation de l'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques. (Brigade de sapeurs-pompiers de Paris, 2009).

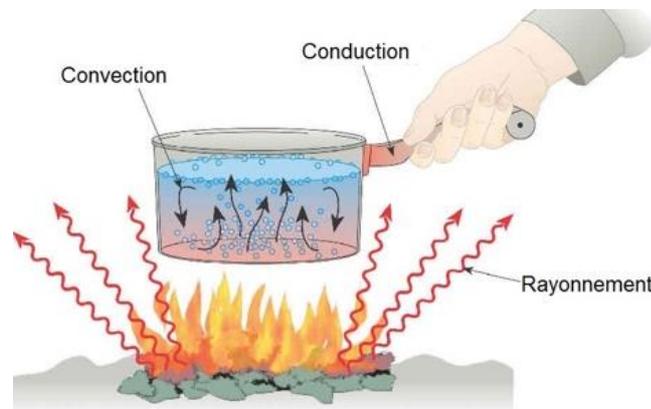


Figure 2: Représentation des phénomènes thermiques (Vershaere, 2018)

Le schéma ci-dessus résume les trois étapes qui conduisent à la propagation d'une flamme.

Une fois que le transfert thermique (via les différents mécanismes décrits dans le paragraphe précédent) sur le combustible a eu lieu, la matière commence son processus de dégradation. Cette dégradation est une décomposition chimique qui amène à la production de gaz de pyrolyse.

Par conséquent, un feu dont le développement n'est pas maîtrisé dans l'espace et dans le temps est défini comme étant un incendie.

C. Lutte

Lors d'un incendie, les intervenants sont pour la plupart directement confrontés aux sinistres. Suivant la nature du feu et de ses conditions, différentes actions peuvent être établies. Le choix de ces actions dépend de plusieurs facteurs, notamment des conditions structurelles (feu de forêt, feu d'habitation...), des enjeux associés à la situation (notion de victimes), des moyens d'actions hydrauliques ou des ventilations disponibles, etc. (Bezier, 2019)

De fait, le choix des actions ne peut ni être modélisable ni généralisé. Néanmoins, en France, une démarche/procédure d'actions successives est adoptée par tous : elle est appelée « marche générale des opérations ». Cette marche correspond à l'approche que doivent avoir les équipes d'intervenants.

Elle comprend neuf phases successives décrites comme :

Les reconnaissances – Les sauvetages et mises en sécurité - Les établissements - La ventilation - L'attaque – La protection - Le déblai et le dégarnissage – La surveillance - Les rondes (Bezier, 2019).

Même si ces étapes restent complémentaires les unes aux autres, elles demeurent soumises au choix du commandant des opérations de secours.

Toutefois, certaines étapes sont incontournables comme l'établissement des moyens hydrauliques, l'attaque du feu, la protection en vue de limiter les dégâts et le déblai qui lui permet de limiter le risque d'une reprise d'incendie.

Ces différentes phases correspondent aux moments où les intervenants sont le plus exposés à la chaleur, mais surtout aux fumées d'incendie.

Afin d'apporter des réponses spécifiques à notre problématique, il faut dans un premier temps connaître de manière précise la composition des fumées. Pour cela, une étude générale des différents types de feu sera réalisée.

II. Les différents types de feu

Il a été choisi d'aborder trois types de feux différents :

- ❖ Feux de forêt dits de « Biomasse »
- ❖ Feux urbains : Appartement/maison
- ❖ Feux de locaux de stockage d'entreprises chimiques

La sélection de ces 3 différents feux a été réalisée de manière à couvrir le maximum de situations d'exposition des professionnels aux fumées d'incendie.

A. Feu de biomasse

1) Exposition en augmentation constante

La prévalence et la gravité des feux de forêt ont augmenté à mesure que le climat de la terre a évolué. Cette évolution est, grâce aux avancées technologique et digitale, de plus en plus prévisible et précise.

En ce sens, l'augmentation de tels évènements accroît les confrontations des professionnels de lutte contre les incendies au feu. Cet enchainement entraine un phénomène mécanique connu : l'engrenage. En effet, l'accroissement des confrontations engendre inévitablement une élévation des risques pour la santé sur le lieu de travail des personnels exposés.

En France, ces feux se déclarent principalement dans la moitié sud de la France, et plus particulièrement dans les régions de la Corse, du Languedoc Roussillon, de la Provence Alpe Côte d'Azur (PACA) et du Rhône-Alpes.

En 2018, lors de l'épisode caniculaire, les incendies se sont multipliés. Le nombre d'interventions enregistrées s'élève à 1036 et 3067 hectares environ de surface moyenne ont été brûlés. (Service-Public, 2019).

Actuellement, pour l'année 2019, le nombre d'interventions s'élève à 1328. En revanche, la surface brûlée est de 6756 hectares (Service-Public, 2019), soit quasiment 7 fois la surface du bois de Vincennes (Chasseraud, 1978).

2) Caractérisation de l'incendie de biomasse

La caractérisation des fumées d'incendies sur les feux de biomasse reste la catégorie la plus renseignée dans la littérature scientifique. En effet, comme en témoignent les évènements majeurs qui ont eu lieu ces 2 dernières années aux États-Unis (Californie) et au Portugal (Algarve), les conséquences sont dramatiques, aussi bien sur le plan économique que sur le plan environnemental et sur le bilan humain.

Vraisemblablement, à l'échelle mondiale, cette typologie de feu reste la plus meurtrière chez les professionnels et chez les civils.

Le dernier rapport du « *Center of Fire Statistics* » (CTIF) fait état d'une moyenne de 317 personnes tuées sur la période de 2012 à 2016 en France, pour une moyenne de 209000 départs de feux sur cette même période, avec un nombre moyen de 10 professionnels tués par an en France. (International Technical Committee for the Prevention and Extinction of fire , 2018)

Par nature, la combustion est incomplète, ce qui entraîne l'émission d'un très grand nombre de polluants au cours du développement du feu. Par conséquent, l'exposition aux produits de combustion augmente le risque d'effets plus ou moins conséquents sur la santé (Stefanidou , Athanaselis, & Spiliopoulou, 2008).

(1) Végétation française

La végétation en France est étendue (23% du territoire) avec une diversité importante. Cela est notamment dû aux différences de climat, mais également à la configuration géologique et topologique du territoire. Actuellement, 136 espèces d'arbres différents sont recensées en métropole, dont 2/3 de la surface totale des forêts (privées et publiques) sont représentés par l'espèce d'arbre « feuillus ». (Service-Public, 2016)

Cette diversité constitue donc le premier critère d'influence de l'émission de polluants. « *De même, concernant l'essence de bois utilisée, la combustion de résineux libère plus de HAP (Hydrocarbures aromatiques polycycliques) que la combustion de feuillus (ex : le sapin émet 7,2 mg/kg de HAP contre 4,8 mg/kg pour le hêtre)* » (INERIS, 2009)

D'autres critères permettent de comprendre en partie les principaux problèmes liés à la caractérisation précise de polluants émis lors des feux de forêts. Dans ce même compte-rendu, l'INERIS fait état d'au moins quatre autres facteurs influençant également les résultats d'émission, notamment le taux d'humidité ainsi que le degré de ventilation du foyer.

Néanmoins, différentes revues détaillent les composés émis lors de feux dits « contrôlés » à partir d'un certain type de végétation. Malheureusement à l'heure actuelle, aucune étude scientifique récente ne fait un état des lieux des polluants émis lors d'incendies de biomasse, avec le type de végétation principalement retrouvé en France. Seule une revue scientifique a été effectuée par des chercheurs français sur la composition des fumées.

En revanche, il existe de nombreuses études sur les feux de biomasse aux Etats-Unis et quelques-unes en Europe, dont une qui a été menée par des scientifiques néerlandais.

(2) États-Unis

Malgré une différence certaine de végétation, les résultats obtenus pour différentes études menées rapportent une certaine analogie dans la démarche visant à estimer les polluants majoritairement présents dans les fumées.

Aux États-Unis, les études scientifiques portant sur ce sujet sont devenues conséquentes. En ce sens, les États-Unis ont créé le 1^{er} congrès international spécialement dédié aux fumées d'incendie. Ce colloque est devenu un point de référence dans l'avancée des problématiques liées aux fumées d'incendie de forêt. Plus précisément, ce congrès traite un panel de sujets tels que les avancées techniques sur la modélisation des fumées, les polluants émergents des nouvelles études, les retours d'expérience de nouvelles pratiques de gestion des fumées et des incendies et l'incidence climatique, sociale et économique qu'elles induisent (International Association of Wildland Fire, 2019).

De nombreux autres congrès ont également vu le jour depuis ces 10 dernières années. Cela montre que la prise en compte de ces problématiques émergentes est de plus en plus importante, notamment par les États-Unis. Nonobstant, cette avancée est en partie liée au nombre d'incendies, et notamment au nombre d'incendies tragiques et extrêmement dévastateurs qui ont lieu chaque année sur leur territoire.

Selon plusieurs études menées par le Urbanski et coll., les émissions de polluants pour ce type d'incendie sont en majorité des polluants émis sous forme de carbone. Notamment du dioxyde de carbone (CO₂), méthane (CH₄) et du monoxyde de carbone (CO). Par ailleurs, plusieurs autres composants principaux tels que du protoxyde d'azote (N₂O), des BTEX (Benzène – Toluène – Ethylbenzène – Xylène), des polluants organiques persistants (POP) sous la forme de dioxines et de furanes, mais également soixante autres substances toxiques ont été détectés. Enfin, dans ces études, une concentration élevée de particules fines et ultra fines a été observée (Urbanski, 2014) (Urbanski, Baker, & Hao, 2009).

Dans son étude de 2009, Urbanski et coll. ont même comparé 5 types de feux de forêt d'origines différentes. Ils ont observé que le feu de « forêt tempérée » possède un nombre plus élevé d'émissions de polluants et de particules fines que les quatre autres (Urbanski, Baker, & Hao, 2009).

D'autres publications américaines ont également permis de mettre en évidence d'autres classes de composés retrouvés dans ce type de fumée, tels que les PCB (Polychlorobiphényles), des pesticides, des herbicides, et des métaux. (Wayne & Cascio, 2018). D'autres composés ont été retrouvés systématiquement dans ces fumées tels que :

- ❖ Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), tels que le naphthalène et phénanthrène, le benzène, des aldéhydes, y compris le formaldéhyde et l'acroléine.
- ❖ Un composé typique issu de la pyrolyse de la cellulose : le lévoglucosan

(3) Europe

En Europe, deux scientifiques néerlandais, Mennen et Van Belle, ont publié pour la première fois des données de mesures sur les fumées d'incendies de forêt issues du service d'accidents environnementaux de leur pays. (Mennen & van Belle, 2007)

Ce rapport a été mis à jour en 2009 avec le soutien d'un comité d'experts, afin d'étudier les voies d'absorption majeures envers les substances les plus fréquemment retrouvées dans les incendies de végétation en Hollande. Trente-deux substances nocives ont été sélectionnées (CF tableau n°1).

En plus des substances spécifiques, les particules en suspension ont été incluses comme polluants. Ces dernières ont été réparties en fonction de leur taille :

- ❖ PM₁₀ : particules inférieures à < 10 µm
- ❖ PM_{2.5} : particules inférieures à < 2,5 µm
- ❖ Particule ultrafine (PM_{0.1}) : particules inférieures à < 0,1 µm

En résumé

Dans ce type de feu, les fumées présentent de nombreux polluants indiqués dans le rapport de l'INERIS, à savoir : du CO, CO₂, du formaldéhyde, des HAP, des BTEX, des dioxines, des métaux lourds (bien souvent le plomb), du phénol et des protoxydes d'azotes. La particularité de ces fumées de biomasse est qu'elles génèrent du lévoglucosan, de l'acroléine, mais surtout qu'elles libèrent une quantité importante d'HAP, notamment des dioxines (furane et dibenzodioxine).

Tableau 1: Substances principales nocives dans un feu de forêt (Mennen & van Belle, 2007)

Substances retenues	
<p> Monoxyde de carbone Dioxyde d'azote Dioxyde de soufre Cyanure d'hydrogène Chlorure d'hydrogène Phosgène Perfluoroisobutylène (PFIB) Fluorure d'hydrogène L'hémipentoxyde de phosphore </p> <p>❖ 8 substances de la famille des hydrocarbures aromatiques</p> <p> Benzène Toluène Etylbenzène Xylène Styrène Chlorobenzène (sous forme mono) Phénol Hexane </p>	<p>❖ 2 substances de la famille des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)</p> <p> Benzo(a)pyrène Pyrène </p> <p>❖ 3 substances de la famille des Aldéhydes et cétones</p> <p> Acroléine Formaldéhyde Acétaldéhyde </p> <p>3 substances de la famille des isocyanates</p> <p> 2,4-Diisocyanate de toluène (2,4-TDI) Isocyanate de méthyle Isocyanate de phényle </p> <p>❖ 3 substances de la famille des Dioxines et furanes</p> <p> Furane Dibenzofurane 2,3,7,8-tétrachlorodibenzo-p-dioxin (TCDD) </p> <p>❖ 1 substance inorganique</p> <p> Plomb </p> <p>❖ Particules en suspension</p>

B. Feu Urbain

1) Point de départ

Au cours d'un incendie d'habitation (appartement ou maison), les produits retrouvés sont en grande partie issus de la dégradation des matériaux utilisés pour la construction, la décoration et l'ameublement.

D'autant plus que « *la cause de l'incendie n'est pas un paramètre déterminant dans la production de fumées toxiques et l'accidentologie effectuée reporte tous types de départ d'incendies : point feu, court-circuit, foudre, malveillance, auto-échauffement ou décomposition exothermique d'un produit, incompatibilité entre réactifs, accident mécanique...* ». (INERIS, 2005)

Ce rapport de l'INERIS ainsi que beaucoup d'autres revues scientifiques ont mis en évidence une gamme de polluants génériques retrouvés habituellement dans les fumées d'incendies. Ces polluants représentent donc le point de départ des recherches approfondies. En effet, même si ces revues scientifiques de renom indiquent la présence de ces gammes de polluants génériques, il n'en demeure pas moins que ces derniers ne sont en aucun cas spécifiques d'un type d'incendie. Or, il serait très réducteur de penser qu'un incendie de biomasse génère exactement les mêmes polluants dans les fumées qu'un incendie d'entrepôt de produits chimiques. Suivant cette même idée, il serait également erroné d'affirmer que les polluants produits dans un incendie bien ventilé pourraient être assimilés au même incendie sous-ventilé.

Ces polluants sont le CO, le CO₂, la vapeur d'eau, le cyanure d'hydrogène (HCN), le chlorure d'hydrogène (HCl), le fluorure d'hydrogène, le bromure d'hydrogène (HBr) et des oxydes d'azote (NO_x). Ce rapport est repris par de nombreuses sociétés de formation mais n'a jamais été enrichi depuis, malgré le fait que d'autres études aient été réalisées sur ce sujet et sur d'autres continents. Seule la Direction Générale de la sécurité civile et de la gestion des crises a publié en mars 2018 un guide prenant en compte les éléments de connaissances actuelles, en excluant les feux d'espaces naturels.

Cela démontre donc bien que depuis plus de 15 ans, cette problématique a été négligée par de nombreuses institutions. (DGSCGC, 2018)

La provenance de ces composés nécessite également d'être étudiée. En effet, après les avoir identifiés, il est nécessaire de savoir quelle sont leurs sources. Après avoir analysé le guide, il ressort que ceux-ci proviennent majoritairement de la dégradation thermique des matières plastiques.

Il existe effectivement différentes sortes de plastiques qui, au même titre que toutes les matières organiques, naturelles ou synthétiques, vont libérer des produits de dégradation à très haute température (INRS, 1999) & (CF annexe n°2).

C'est la nature des plastiques qui va avoir une influence sur les produits émis lors de la dégradation thermique. Par exemple, le polyacrylonitrile produit en cas de pyrolyse ou de combustion du CO, du CO₂, du HCN, de l'acrylonitrile, de l'ammoniac (NH₃), des NO_x et des hydrocarbures aliphatiques.

Pour les matières plastiques contenant des atomes de chlore, fluor ou soufre, il y aura production de composés dérivés d'hydrogène.

Tableau 2: Principaux produits émis lors de la dégradation thermique en fonction des familles de plastiques

Famille Plastique	Principaux produits de dégradation thermique
Polymères chlorés	Chlorure d'hydrogène et hydrocarbures chlorés
Polyfluoroéthènes	Composés fluorés et fluorure d'hydrogène
Polymères azotés : polyamides, polyuréthanes, polyacrylonitrile, aminoplastes	Ammoniac, nitriles, cyanogènes, cyanure d'hydrogène, oxydes d'azote
Polysulfones et polysulfure de phénylène	Dioxyde de soufre, sulfure d'hydrogène

2) Une famille émergente de composés

Il a été remarqué au cours de ces recherches, qu'une grande famille de composés était retrouvée dans la totalité des expériences dirigées. Cette famille se nomme Composés organiques volatils (COV). Dans cette dernière est présente la majorité des composants organiques cités par le rapport de l'INERIS (INERIS, 2005). Ce sont des molécules chimiques peu volatiles à température ambiante. Cependant, en présence d'une source de chaleur, celles-ci deviennent gazeuses. Ainsi, les COV peuvent se retrouver à la fois sur les particules solides de poussière et dans l'air ambiant.

Les COV comprennent également une sous-famille appelée : composés organiques semi-volatils (COSV). Ces deux groupes décrivent une vaste gamme de molécules à base de carbone avec divers groupes fonctionnels.

Les COV sont définis par la directive européenne du 11 mars 1999, relative à la réduction des émissions de COV dues à l'utilisation de solvants organiques dans certaines activités et installations. Les définitions sont les suivantes :

- ❖ Composé organique volatil (COV) : « *Tout composé organique ayant une pression de vapeur de 0,01 kPa¹¹ ou plus à une température de 293,15 K ou ayant une volatilité correspondante dans les conditions d'utilisation particulières. Aux fins de la présente directive, la fraction de créosote qui dépasse cette valeur de pression de vapeur à la température de 293,15 K est considérée comme un COV* » ; (Parlement et Conseil européen, 2000)

- ❖ Composé organique semi-volatil (COSV) : sont des molécules chimiques peu volatiles dans les conditions normales (pression et température ambiante) mais qui, dans des conditions particulières, deviennent volatiles (Institut de Recherche et d'Expertise Scientifique, s.d.).

Des mélanges complexes de COV / COSV sont générés lors de feux accidentels sous forme de produits de combustion incomplète, et nombre d'entre eux sont réputés pour causer des dommages considérables sur la santé humaine et l'environnement.

3) Une nouvelle étude sur les COV

(1) Scénario choisi

En 2017, Hewitt et coll. ont réalisé un focus sur les COV et COSV. Leur étude porte sur une série de feux expérimentaux dans des maisons où de l'huile de cuisson ou un seul canapé (conformes aux réglementations britanniques relatives à l'inflammabilité des meubles) ont été utilisés comme sources de combustibles initiales aux incendies. (Hewitt, Christou, Dickens, Walker, & Stec , 2017)

Tableau 3: Identification des scénarios d'incendie de maison

Pièce	Matériaux présent
Salon	Canapé / Télévision / Moquette
Cuisine	Rideaux / Placards

Il est bon de noter que les conditions de ventilation variaient en fonction de chacun des scénarios. Les scénarios ont été répétés deux fois, selon 2 modes de ventilation différents. Soit la ventilation permettait une combustion « complète » (feu ventilé), soit elle était réduite pour obtenir une combustion incomplète (feu sous-ventilé). Dans notre cas, nous ne tiendrons pas rigueur de la différence entre le scénario d'un feu ventilé et celui d'un feu sous-ventilé.

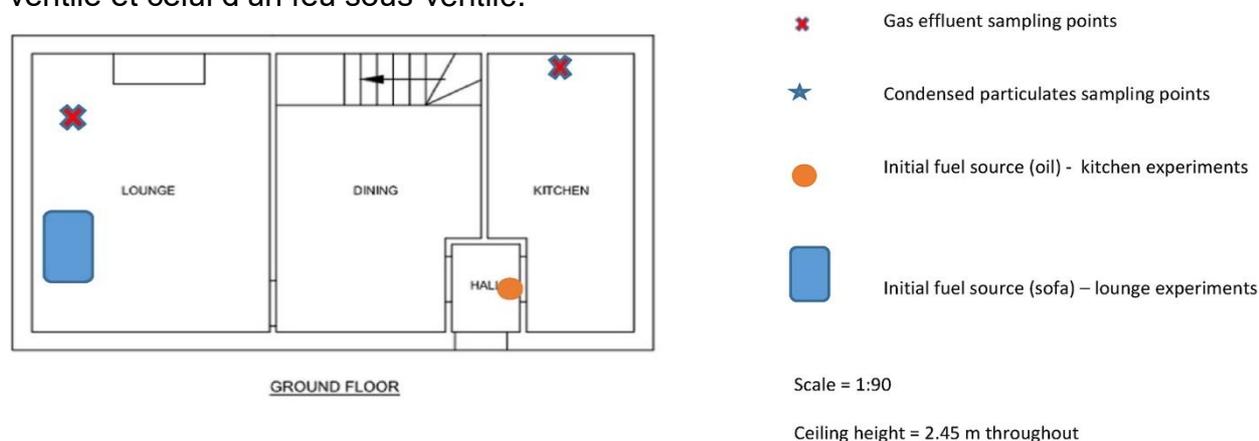
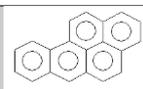


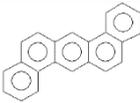
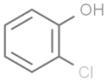
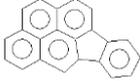
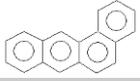
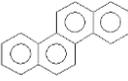
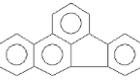
Figure 3: Plan des maisons utilisées pour les scénarios d'incendie

(2) Résultats

Les composés détectés dans les effluents gazeux présentés dans le tableau ci-dessous sont ceux sélectionnés par l'équipe d'Hewitt en fonction de leur toxicité, classés par ordre de toxicité décroissante. La classification s'est effectuée principalement, voire exclusivement, sur les critères du CIRC liés aux effets cancérigènes de chaque composé. Dans cette liste (CF tableau 4), seuls les composés classés au minimum en catégorie de groupe 2B sont présentés.

Tableau 4: COV et COSV les plus cancérigènes détectés dans la plupart des expériences d'Hewitt et coll.

Noms	Structure	Toxicité
Benzo(a)pyrene		IARC Groupe 1

<i>Dibenzo(ah)anthracene</i>		IARC Groupe 2A
<i>Naphthalene</i>		IARC Group 2B
<i>2-chlorophenol</i>		IARC Group 2B
<i>Indeno(1.2.3-dc)pyrene</i>		IARC Group 2B
<i>Benzo[c]phenanthrene</i>		IARC Group 2B
<i>Benz(a)anthracene</i>		IARC Group 2B
<i>Chrysene</i>		IARC Group 2B
<i>Benzo(k)fluoranthene</i>		IARC Group 2B
<i>Benzo(b)fluoranthene</i>		IARC Group 2B

Soixante-dix-neuf autres COV ont été retrouvés dans les différentes analyses d'échantillons par chromatogrammes.

Les données de toxicité spécifiques à ces autres composés sont regroupées dans le tableau présenté en annexe n°3. Bien qu'il ait été possible de ranger par ordre décroissant les composés selon les classements donnés par le CIRC, certains composés ne sont classés dans un aucun des groupes du centre international. Dans ce cas, ce sont les données issues de l'EPA et de l'OSHA qui ont été prises en compte pour effectuer ce classement.

Pour rappel, la classification du CIRC n'a pas de caractère réglementaire. Néanmoins, ce sont des experts internationaux qui se réunissent afin d'examiner les études publiées sur un agent (produits chimiques, agents biologiques, agents physiques) et qui en évaluent le caractère cancérigène lors de commissions. (Département Cancer Environnement, 2018)

Plusieurs critères entrent dans la classification d'une substance. Pour mieux en apprécier la lecture, un tableau récapitulatif a été réalisé ci-dessous (cf tableau n°5).

Tableau 5: Classement des agents en fonction de la preuve d'indication des 3 critères pris en compte par le CIRC ¹

<u>Poids de la preuve</u>			Classe d'agents
Apparition de cancer issue d'études chez l'homme	Apparition de cancer issue d'études expérimentales chez l'animal	Mécanisme de cancérogénicité	
Suffisantes	Pas nécessaire	Pas nécessaire	GROUPE 1 : Agent cancérogène (certain ou avéré) pour l'homme
Limitées ou insuffisantes	Suffisantes	Fortes présomptions (exposition humaine)	
Limitées	Suffisantes	Fortes présomptions ; Limitées ou insuffisantes	GROUPE 2A : Agent probablement cancérogène pour l'homme
Insuffisantes	Suffisantes	Fortes présomptions (Cellules ou tissus humains)	
Limitées	Très insuffisantes	Fortes présomptions	
Limitées ou insuffisantes	Pas nécessaire	Fortes présomptions	
Limitées	Très insuffisantes	Limitées ou insuffisantes	GROUPE 2B : Agent peut-être cancérogène pour l'homme (Cancérogène possible)
Insuffisantes	Suffisantes	Fortes présomptions ; Limitées ou insuffisantes	
Insuffisantes	Très insuffisantes	Fortes présomptions	
Limitées	Suffisantes	Fortes présomptions (mais mécanismes différents chez l'homme et animal)	
Insuffisantes	Suffisantes	Fortes présomptions (mais mécanismes différents chez l'homme et animal)	GROUPE 3 : Agent inclassable quant à sa cancérogénicité pour l'homme
Toutes les autres situations non énumérées ci-dessus			

Enzo AVERNANI - ILLUS - INSTITUT NATIONAL D'INGÉNIERIE DE LA SANTÉ
 Les termes notés en **gras italique** représentent les preuves suffisantes pour le CIRC pour classer un agent dans un groupe.

Cependant, en plus des COV et des COSV retrouvés au cours de ces séries d'incendie, l'équipe d'Hewitt a détecté neufs composés phosphorés à la fois dans les suies et dans les effluents gazeux (peu importe le mode de ventilation associé). Étant donné que la configuration des pièces a été choisie, Hewitt et coll. affirme que ces composés ont été générés par la décomposition des canapés de manufacture anglaise conformes à la législation du pays ; c'est-à-dire que les canapés ont tous reçu un traitement afin de réduire le temps de combustion et ainsi, les rendre moins inflammables. Ce traitement est composé de retardateurs de flammes.

Cela met donc en évidence que de tels composés peuvent se volatiliser, et même supporter de très hautes températures.

Dans cette étude, ni le formaldéhyde ni le benzène n'ont été retrouvés. Pourtant ces deux composés sont des COV incontournables, retrouvés systématiquement dans les fumées d'incendies. La non détection de ces molécules est probablement due à la méthode utilisée (GC-MS), dans laquelle un temps de traitement est nécessaire pour passer à travers le système de détection.

En résumé

Dans ce type de feu, les fumées présentent de nombreux polluants indiqués dans le rapport de l'INERIS à savoir du CO, CO₂, des HAP, des NO_x, du phénol mais aussi du formaldéhyde, des BTEX dans des proportions plus importantes que pour des feux de biomasse. La particularité de ces fumées de feu urbain provient du fait qu'on y retrouve une quantité importante de COV, dû notamment aux peintures et aux matériaux de construction. Aussi, on y retrouve un bon nombre de retardateurs de flammes et des composés tels que l'ammoniac, le nitrile, le cyanogène (C₂N₂), l'HCN, et des NO_x issues essentiellement des objets de décorations.

C. Feux de locaux de stockage d'entreprise chimique

4) Le projet TOXFIRE de 1996

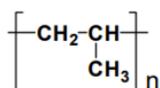
L'importance des émissions toxiques provenant des incendies a été reconnue dans le projet TOXFIRE réalisé en collaboration avec des partenaires du Royaume-Uni, de Suède, de Finlande et du Danemark de 1994 à 1996 (Lönnermark, Blomqvist, Mansson, & Persson, 1996).

Le projet TOXFIRE été lancé pour évaluer les conséquences potentielles des incendies dans les usines de produits chimiques, telles que les usines de pesticides où les stockages de produits hautement dangereux autant pour l'homme que l'environnement sont des scénarii fréquents.

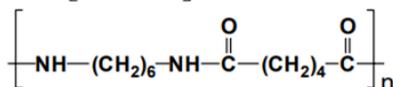
(1) Les matériaux utilisés

Dans ce projet de tests à échelle moyenne, cinq matériaux différents ont été choisis. Le choix de ces composés a été effectué au vu de leurs caractéristiques techniques et physico-chimiques (capacité à brûler dans de mauvaises conditions de ventilation), mais également car ce sont les plus retrouvés en grande quantité dans les zones de stockage d'usines chimiques. Les matériaux testés étaient :

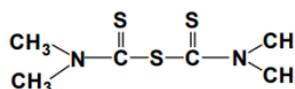
❖ Polypropène (PP)



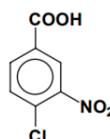
❖ Nylon 66 (Ny66)



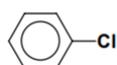
❖ Monosulfure de tétraméthylthiurame (TMTM)



❖ Acide 4-chloro-3-nitrobenzoïque (CNBA)



❖ Chlorobenzène (CB)



D'après les différentes publications du projet TOXFIRE (Research Institutes of Sweden, 1996) , il apparaîtrait que ces matériaux ont également été sélectionnés pour leur émission toxique potentielle, mais aussi dans l'optique d'obtenir une complexité raisonnable dans la composition d'effluent gazeux. Le TMTM, le CNBA et le chlorobenzène sont des substances de type pesticide composés d'hétéroatomes comme : le chlore (Cl), l'azote (N), le phosphore (P) et le soufre (S). Le polypropylène (PP) est un polymère utilisé dans l'emballage. Enfin, le nylon est quant à lui utilisé comme substance de référence tout au long du projet.

(2) Le scénario choisi

Afin de pouvoir fournir des résultats de tests corrects et reproductibles, les chercheurs ont donc choisi de réaliser leurs expériences dans une salle certifiée ISO 9705. Ces salles sont conformes à la norme internationale ISO. Elles sont utilisées pour évaluer la réaction des matériaux au feu selon la méthode ISO 9705. A cette époque, la norme en vigueur était l'ISO 9705 :1993. Suivant la norme de 1993, ce test ainsi effectué, il permettait d'évaluer la production de fumée, de gaz toxiques (selon les ressources d'époque) et la propagation des flammes. Aujourd'hui, la norme a évolué et a donné lieu à une révision depuis l'année 2016 : ISO 9705v2016 (ISO, 2016) (ISO, 1993).

La disposition de cette salle est la suivante :

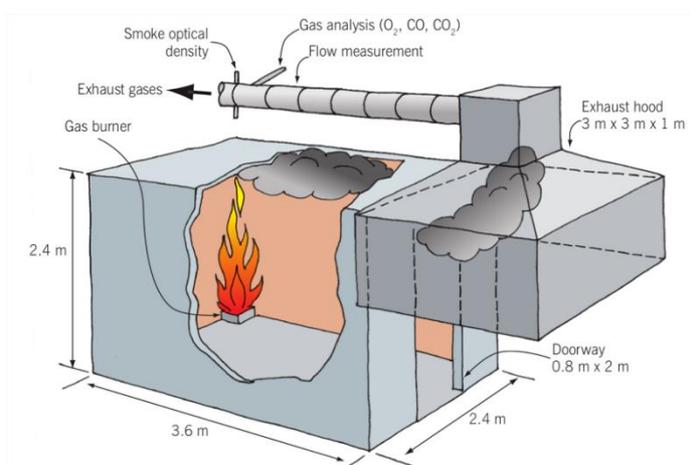


Figure 4: Schéma salle ISO 9705 (ISO, 1993)

- ❖ Longueur de 3,6 m
- ❖ Hauteur de 2,4 m
- ❖ Largeur de 2,4 m

Néanmoins, contrairement aux recommandations ISO 9705 v1993, les expériences n'ont pas été pratiquées selon la norme. En effet, les expériences de combustion menées ont été effectuées avec une quantité de matière (produits chimiques) brûlée d'environ 100 kg. De plus, cette norme est applicable uniquement pour tester des matériaux de surfaces.

Dans cette salle ISO 9705, les produits chimiques testés ont pour la plupart été placés dans un bac en acier. Cet agencement de tests a été considéré comme optimal et suffisamment large pour représenter des conditions réelles.

Quatre expériences individuelles ont été réalisées dans la salle ISO 9705, sur chacun des matériaux testés. Quelques essais ont été réalisés dans une enceinte d'essai encore plus grande, 256 m³, conçue pour permettre de "vraies" configurations de stockage.

En conséquence, ils ont caractérisé les produits de combustion provenant de la combustion des mêmes matériaux.

Au cours de ces tests, tous les paramètres d'essai d'incendie courants ont été mesurés, tels que la température, le taux de dégagement de chaleur, le taux de production de fumée, etc. De plus, de nombreuses mesures ont été effectuées pour caractériser les gaz de fumée.

(3) Résultats

Le but des expériences était principalement de quantifier les gaz de combustion connus de l'époque à savoir : le CO, HCN, N₂O, NO, NO₂, SO₂ et HCl. De plus, les produits de décomposition ont été analysés par une chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (CG/MS). L'ensemble des résultats sont présentés dans l'annexe n°4.

Dans ce type de configuration, la composition dépend des composés brûlés. Néanmoins, on peut classer par ordre décroissant la production de gaz recherchée : CO>HCN>NO>NH₃. Il est à noter que la majorité des pesticides contenant de l'azote ont produit du benzonitrile, et une quantité significative de l'HCl ou du SO₂.

Enfin, toutes les substances testées ont produit des composés aromatiques, tels que le benzène, le toluène, le phénanthrène, l'anthracène et les dioxines.

En résumé

Les polluants retrouvés dans les fumées d'incendies sont très diversifiés. En effet, la plupart des polluants émis sont en majeure partie liés à la combustion des matériaux et au type de combustion. Néanmoins, quelques éléments émis sont propres à chaque type d'incendie. Par exemple, une quantité plus importante de dioxine et d'acroléine est retrouvée dans le feu de biomasse, tandis qu'on retrouve exclusivement des retardateurs de flamme dans les feux urbains. Pour autant, en réalité, chaque incendie est différent. Cela occasionne une combinaison encore plus importante de polluants émis dans les fumées et par conséquent, une exposition d'autant plus dangereuse pour les personnes exposées.

Malgré la diversité observée, des polluants « communs » sont retrouvés dans les fumées comme le CO, le CO₂, l'HCN, les NO_x, le formaldéhyde, le benzène, le naphthalène les dioxines (PCDD/F) ...

La plupart de ces composés sont bien décrits dans les revues scientifiques et leurs toxicités sont bien connues du grand public. Afin d'apporter des connaissances supplémentaires aux lecteurs et aux futurs usagers de ce mémoire, il a été choisi d'étudier la dangerosité de certains polluants généralement très peu connus du grand public. Pourtant, ils sont retrouvés de manière quasi-systématique dans les fumées lors d'incendie.

III. Dangerosité des polluants

A. Choix des polluants

Il a été choisi d'approfondir la toxicité des polluants suivants :

Retrouvés systématiquement :

- ❖ PM_{2.5} et PM₁₀ (*retrouvés systématiquement*)
- ❖ Le benzo(a)pyrène et le naphthalène (*HAP retrouvés systématiquement*)
- ❖ Benzène, Toluène, Ethylbenzène, Xylènes (BTEX) (COV retrouvés systématiquement)

Retrouvés plus spécifiquement dans les incendies de biomasse et urbains

- ❖ L'acroléine (*retrouvée abondamment dans les incendies de biomasse*)
- ❖ Retardateur de flamme (*retrouvé exclusivement dans les incendies urbains*)

B. Particules en suspension 2.5 et 10

Les particules en suspension commencent à faire l'objet de quelques études dans les années 1980. Ces études mettent en évidence le fait que les particules inhalables sont les particules ayant un diamètre aérodynamique inférieur à 10 µm. (Dockery, 2009).

La communauté scientifique en a déduit que les particules supérieures à 10 µm sédimentaient beaucoup trop vite. De ce fait, leur durée de vie dans l'air est significativement réduite. Aujourd'hui, avec l'avancée technologique, les PM sont classées en 4 catégories en fonction de leur diamètre aérodynamique :

- ❖ Les PM₁₀ correspondent généralement à la fraction qui va pénétrer dans l'appareil respiratoire et qui va pouvoir migrer jusque dans les voies aériennes supérieures (Donaldson & Stone, 2003).
- ❖ Les PM_{2.5} sont les particules de l'air inhalables ayant un diamètre aérodynamique inférieur à 2,5 µm. Ces derniers sont également connus sous le nom de particules fines (PF). Cette fraction, quant à elle, pénètre l'appareil respiratoire et va pouvoir migrer jusqu'aux alvéoles pulmonaires, soit plus loin que les PM₁₀. (Donaldson & Stone, 2003).
- ❖ Il existe deux autres catégories intitulées : PM_{1,0} et PM_{0,1}. Ces derniers permettent de catégoriser les particules ayant un diamètre aérodynamique inférieur à 1,0 µm et celles inférieures à 0,1 µm (soit 100 nm). Les études actuelles, concernant les fumées d'incendies ont uniquement détecté des

PM₁₀ et PM_{2,5}. La partie suivante traitera exclusivement de la toxicité des PM₁₀ et PM_{2,5}.

Pour pouvoir qualifier et comparer les différentes particules retrouvées, des paramètres de référence ont été définis. En effet, les particules émises ne peuvent pas être caractérisées uniquement en fonction de leur taille. D'autres paramètres nécessitent d'être pris en compte :

- ❖ La capacité de pénétration dans l'appareil respiratoire (distribution granulométrique)
- ❖ La surface spécifique de contact
- ❖ Le potentiel zéta (charge surfacique)
- ❖ La composition chimique (organique ou inorganique)
- ❖ L'interaction entre PM et les autres polluants de l'air.

Néanmoins, parmi ces paramètres, la composition chimique des particules est un des facteurs déterminants pour connaître le profil toxicologique (propriétés toxicodynamiques et toxicocinétiques). A noter que cette dernière varie avec le temps et les conditions météorologiques.

1) Toxicité des PM₁₀ et PM_{2,5}

(1) Effets chroniques CMR

Les particules fines ont cette capacité de pénétrer en profondeur dans les poumons. Une fois à l'intérieur, elles peuvent générer du stress oxydant. Cela déclenche la formation d'ERO, aboutissant généralement à une réponse inflammatoire (Van Den Heuvel, Staelens, Koppen, & Schoeters, 2018). De plus, Il apparaîtrait également que les particules fines induiraient des effets génotoxiques liés à la capacité des espèces réactives de l'oxygène (ERO) d'oxyder une base de l'acide désoxyribonucléique (ADN) pour former la 8-oxo-2' désoxyguanosine (Gabelova, et al., 2007).

D'autre part, plusieurs études scientifiques dont une publication de Lepers et coll., indiquent que « *les agents chimiques contenus dans les PM_{2,5}, ou les PM_{2,5} elles-mêmes, sont capables de modifier la méthylation de l'ADN. Plusieurs études in vitro ont ainsi mis en évidence des modifications du profil de méthylation de l'ADN après exposition de cellules hépatiques de rat au cadmium (31) ou de cellules A549 à l'arsenic* » (Lepers, et al., 2014).

La méthylation de l'ADN influe donc sur les mécanismes épigénétiques qui eux-mêmes jouent un rôle déterminant dans la régulation de l'expression génique. L'altération de ce mécanisme épigénétique peut donc aussi jouer un rôle fondamental dans le processus de développement du cancer (cancérogenèse).

Dans un autre contexte, les particules en suspension sont particulièrement décrites et suivies. C'est le cas de la problématique de la qualité de l'air extérieur qui, depuis 2005, devient de plus en plus documentée. Sur cette lancée, en 2013, le CIRC a classé en tant que cancérigènes pour l'homme (groupe 1) la pollution atmosphérique et les matières particulaires contenues dans la pollution atmosphérique.

(1) Effets chroniques non CMR

La communauté scientifique, à travers plusieurs études épidémiologiques sur les PM_{2.5} et PM₁₀ et les effets sur la santé des populations, s'accorde à dire que ces particules engendrent une augmentation accrue de maladies respiratoires telles que l'asthme, la bronchopneumopathie chronique obstructive (BPCO), le cancer des poumons, mais également des maladies cardiovasculaires et cérébro-vasculaires (Tordjman, 2009). Ces dernières se traduisent par une augmentation significative du nombre d'accidents vasculaires cérébraux (AVC) ischémiques et hémorragiques (Pope, 2015).

En France, les valeurs limites annuelles réglementaires de ces particules sont respectivement de 40 µg/m³ pour les PM₁₀ et de 25 µg/m³ pour les PM_{2.5} (Legifrance, 2010). Malgré tout, les dépassements de ces valeurs sont autorisés.

C. Hydrocarbures aromatiques polycycliques

Les HAP sont des composés organiques apolaires formés exclusivement d'atomes de carbone et d'hydrogène. Chaque molécule d'HAP est organisée en cycles aromatiques : au minimum de deux cycles aromatiques et au maximum de six cycles aromatiques. En théorie, il existerait plus de mille molécules différentes d'HAP mais actuellement, seule une centaine de ces molécules a été identifiée. Par le fait du grand nombre, l'OMS et l'US-EPA ont restreint la quantité à seize HAP dits « prioritaires » (CF annexe n°5). Cette famille de composés est principalement issue de la pyrolyse de la matière organique et se révèle très documentée. En effet, ces molécules sont ubiquistes. Elles sont retrouvées dans la composition du charbon, du pétrole, dans la fumée de gaz d'échappement, dans la fumée de tabac, dans les produits alimentaires passés au grill, dans les produits pétroliers, les huiles minérales, etc.

Ces domaines sensibles pour la population font donc régulièrement l'objet de publications concernant l'exposition professionnelle.

Ces composés sont classés en fonction du nombre de cycles aromatiques :

- ❖ HAP « légers » si le nombre de cycles aromatiques est inférieur à quatre
- ❖ HAP « lourds » lorsque le nombre de cycles aromatiques excédents est supérieur à trois

En 1998, du fait de leur caractère ubiquiste, de leur résistance à la dégradation biologique et de leur nocivité pour l'environnement et pour l'homme, quatre HAP (le benzo(a)pyrène, le benzo(b)fluoranthène, le benzo(k)fluoranthène, l'indeno(1,2,3-cd)pyrène) ont été ratifiés lors du protocole d'Arrhus visant à interdire 16 autres POP (Citepa, s.d.). Ce protocole fait suite à la convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance adoptée en 1979 à Genève. Cette dernière a pour objectif de réduire les polluants atmosphériques en élaborant des stratégies appropriées aux différentes parties signataires. Nonobstant, compte-tenu de l'objectif de l'état français de réduire significativement les substances toxiques, quatre autres HAP (le benzo(g,h,i)pérylène, l'anthracène, le fluoranthène, le naphthalène) ont été ajoutés lors de la prise en compte de l'arrêté du 31 janvier 2008 concernant le « registre et à la déclaration annuelle des émissions polluantes et des déchets » (Legifrance, 2008).

Par la suite, il a été choisi d'étudier la toxicité de deux molécules appartenant à cette famille : le benzo(a)pyrène (B(a)P) et le naphthalène. Cela pour deux raisons essentielles. La première, car le naphthalène est le plus léger des HAP à l'instar du B(a)P qui fait partie des plus lourds. La seconde, car ce sont deux HAP assez bien documentés et très présents dans la fumée d'incendie.

1) Toxicité du Benzo(a)pyrène

(1) Effets chroniques CMR

Comme la plupart des HAP, le benzo(a)pyrène est lipophile, hydrophobe et peu volatil (5 cycles aromatiques) mais peut s'adsorber sur des poussières. La principale voie d'absorption est la voie respiratoire. Les voies cutanée et digestive restent des voies d'absorptions non négligeables puisque l'activité main-bouche, l'ingestion d'aliments grillés ou bien le contact prolongé avec un vêtement contaminé sont des situations que l'on rencontre très fréquemment chez les pompiers.

Le benzo(a)pyrène, une fois métabolisé via le Cytochrome P450 au niveau hépatique et par oxydation, produit un époxyde (composé très réactif) qui va pouvoir former des adduits à l'ADN préférentiellement avec la guanine ou l'adénine. (Perera, Fleming, Johnson, Burrows, & White, 2017). Par ailleurs, en 2010, le CIRC a classé le B(a)P comme cancérigène pour l'être humain (groupe 1) (INRS, FT n°144 - Benzo(a)pyrène, 2007).

Il apparaîtrait qu'un individu exposé à de faibles concentrations peut développer de nombreux cancers. Ce phénomène s'appuie sur des tests réalisés sur des animaux de laboratoire. Des études épidémiologiques sur les travailleurs exposés au B(a)P ont mis en évidence une augmentation significative du nombre de cancers des poumons, broncho-pulmonaires, de la vessie et de l'appareil gastro-intestinal, et probablement du foie mais cela reste à confirmer par d'autres études (INRS, FT n°144 - Benzo(a)pyrène, 2007).

D'autre part, il est vrai que des études chez l'animal ont mis en évidence des effets indésirables sur la reproduction et le développement. Cependant, ces effets n'ont généralement pas été observés chez l'homme ; c'est la raison pour laquelle le B(a)P a été classé en catégorie 2 (toxique pour la reproduction) par l'union européenne (INERIS, Benzo(a)pyrène, 2006).

(2) Effets chroniques non CMR

D'après la fiche toxicologique de l'INRS, il est écrit que le B(a)P « *provoque une atteinte de l'état général ainsi qu'une aplasie médullaire mortelle sur certaines souches de l'animal* » selon les études expérimentales (INRS, FT n°144 - Benzo(a)pyrène, 2007).

En outre, un rapport datant de 1939 fait état des effets locaux du B(a)P lié au contact cutané quotidien (protégé et non protégé) effectué sur 26 patients. La période de traitement a duré quatre mois. Pendant celle-ci, les symptômes suivants sont apparus : érythème, pigmentation, desquamation, formation d'excroissances et d'infiltrats ressemblant à des verrues. Toutefois, il est précisé que deux à trois mois après la fin du traitement, les symptômes étaient réversibles dans presque tous les cas (Cottini & Mazzone, 1939).

En France, il n'existe pas de valeur limite d'exposition professionnelle pour ce polluant. Néanmoins, il existe une recommandation datant de 2007 de la Caisse Nationale d'assurance maladie, qui a pour objectif provisoire de maintenir la teneur en polluants à une valeur inférieure à 150ng/m³ (INRS, FT n°144 - Benzo(a)pyrène, 2007).

2) Toxicité du Naphtalène

(1) Effet chroniques CMR

Contrairement au B(a)P, le naphtalène est le plus volatil et le plus léger des HAP du fait de sa configuration chimique. En effet, celui-ci possède uniquement deux cycles aromatiques. Bien qu'il soit très volatil, la voie cutanée n'en demeure pas moins négligeable du fait de son degré de liposolubilité élevé.

Après l'absorption, le naphtalène est comme le B(a)P, pris en charge et métabolisé par le Cytochrome P450 aux niveaux hépatique, oculaire ou pulmonaire. Il y subit alors une oxydation qui va permettre la production d'un époxyde. Cette étape est généralement suivie tantôt d'une hydratation puis d'une réduction, tantôt d'une conjugaison avec du glutathion (INRS, FT n°204 - Naphtalène , 2007).

L'IARC a indiqué que les données (surtout chroniques) sur l'exposition de l'homme à ce polluant sont manquantes. Nonobstant, les études chez l'animal prouvent que l'inhalation du naphtalène induit des cancers broncho-pulmonaires et des tumeurs malignes des cellules de la crête neurale (neuroblastomes). C'est la raison pour laquelle, en 2002, l'IARC a classé la molécule en tant qu'agent pouvant être cancérigène pour l'homme (groupe 2B) (INRS, FT n°204 - Naphtalène , 2007).

(2) Effets chroniques non CMR

Malgré le manque de données, quelques rapports ont permis de mettre en évidence des symptômes liés à une exposition chronique par contact cutané et inhalation. Ces symptômes sont en partie similaires aux effets aigus. Par exemple, il est observé l'apparition d'anémie hémolytique principalement chez les personnes ayant une déficience de l'enzyme glucose-6phosphate déshydrogénase (G6PD) essentielle à l'équilibre. Cette enzyme (G6PD) sert à maintenir une concentration suffisante de glutathion réduit.

De plus, d'autres effets chez l'animal sont observés comme l'irritation des voies aériennes, le développement de la cataracte ou encore les troubles mentaux et digestifs (INRS, FT n°204 - Naphtalène , 2007)

En France, il existe une valeur moyenne d'exposition (8h) dans l'air des lieux de travail qui est de 50 mg/m³(10 ppm) (INRS, FT n°204 - Naphtalène , 2007) alors qu'aux Etats-Unis, le *National institute for occupational safety and health* (NIOSH) a établi en plus de cette valeur, une valeur limite de courte durée de 75mg/m³ (15 ppm) (NIOSH, 2018).

D. L'acroléine

L'acroléine fait partie de la grande famille des aldéhydes, elle-même incluse dans celle des COV. Elle est notamment le plus simple aldéhyde insaturé, utilisé comme intermédiaire pour former de l'acide acrylique qui est lui, utilisé pour la fabrication de polymère (plastique, peinture, adhésif, ...) (INRS, FT n°57 - Acroleine, 2015). L'acroléine est également utilisée dans l'industrie chimique comme pesticide pour contrôler la croissance des plantes et des algues dans les canaux d'irrigation. Cette molécule est également retrouvée dans la combustion des gaz d'échappement (combustion) et dans les fumées de cigarette (tabac et électronique) (Papoušek, Pataj, Nováková, Lemr, & Barták, 2014).

Ce polluant est une molécule dont les effets aigus sont très documentés. En revanche, les effets chroniques le sont très peu. De fait, la toxicité aiguë et la toxicité chronique seront étudiées dans les paragraphes suivants.

1) Toxicité

(1) Effets aigus

L'acroléine est volatile à température ambiante. Par conséquent, elle est donc préférentiellement absorbée par inhalation. Néanmoins, elle peut aussi être absorbée par voie orale car elle représente un produit de dégradation lorsque les huiles sont chauffées ou par contact cutané dans des proportions bien inférieures. Actuellement, la toxicité la plus importante de cette molécule est la toxicité aiguë (INRS, FT n°57 - Acroleine, 2015). En effet, les vapeurs d'acroléine entraînent une irritation importante des voies aériennes supérieures à faible concentration et peuvent également être létales à des doses plus importantes. Par exemple, l'un des seuils des effets létaux significatifs est de deux heures pour une quantité absorbée de 23mg/m^3 (INERIS, Seuils de Toxicité aiguë - Acroléine, 2008). Par ailleurs, le contact direct provoque de graves brûlures chimiques au niveau de la peau et des yeux. L'ingestion du xénobiotique entraîne de graves irritations ainsi que des brûlures chimiques des muqueuses le long du système gastro-intestinal. De surcroît, l'exposition à des niveaux élevés d'acroléine peut également affecter le système nerveux central et en entraîner ainsi une dépression (ATSDR, 2014).

(2) Effets chroniques CMR

Concernant la toxicité chronique, même si le CIRC a classé la substance dans le groupe 3, elle n'en demeure pas moins préoccupante. En effet, l'acroléine induit des résultats positifs au test d'Ames même si aucun effet génotoxique n'a été rapporté (INRS, FT n°57 - Acroleine, 2015). Paradoxalement au classement du CIRC, le département de la santé et des services sociaux des États-Unis (HHS) a déterminé que l'acroléine pouvait être cancérigène pour l'homme.

En France, il existe une valeur limite indicative à court terme dans l'air des lieux de travail qui est de 0,25 mg/m³ (INRS, FT n°57 - Acroleine, 2015). En comparaison, aux États-Unis, le NIOSH a plutôt établi une valeur d'exposition moyenne de 0,25mg/m³ (NIOSH, 2018), ce qui rend donc une limite encore plus restrictive que celle qui est indiquée en France.

E. Benzène, Toluène, Ethylbenzène et Xylène (Ortho/méta/para)

L'ensemble de ces molécules est appelé couramment BTEX. Cette famille de composés appartient à la famille des COV et des hydrocarbures aromatiques monocycliques.

De manière générale, les BTEX proviennent de diverses sources anthropiques comme la fabrication de peinture, le raffinage de pétrole ou encore par les gaz d'échappement imbrûlés. Malgré leur configuration proche, leurs effets varient d'un composé à un autre. Les effets de ces polluants sont à la fois très proches et très différents. Afin de mieux comprendre et de saisir les différences entre cet ensemble de molécules très proches, un focus sera effectué sur la toxicité de manière générale.

1) Toxicité

Ce sont donc des composés très toxiques, tant sur le plan environnemental que sur le plan sanitaire. Parmi ces quatre composés, seul le xylène n'est pas catégorisé en tant que produit CMR. Néanmoins, ils sont tous classés comme irritants. L'évaluation du CIRC donne le classement de toxicité suivant :

Tableau 6: Classification des BTEX selon les informations du CIRC

Benzène	Groupe 1
Ethylbenzène	Groupe 2B
Toluène	Groupe 3
Xylène	Groupe 3

De par leur configuration, les molécules sont très volatiles et sont, par conséquent, absorbées principalement par inhalation.

(1) Effets principaux du benzène

Chez l'homme, le BTEX le plus toxique est le benzène. Une fois inhalé, il est distribué préférentiellement dans les tissus riches en lipides (cerveau, sang, foie) et sa métabolisation peut se faire selon 3 mécanismes différents décrits dans l'annexe n°6 (INRS, FT n°49 - Benzène, 2011).

En plus des nausées, des maux de tête ou des effets irritants pour la peau, les voies respiratoires et les yeux, le benzène entraîne de nombreux effets chroniques. Les systèmes nerveux et hématopoïétique sont les deux cibles principales. Concernant le système hématopoïétique, le benzène cible plus particulièrement la moelle osseuse et altère la capacité de prolifération des cellules souches (hématopoïèse) (INRS, FT n°49 - Benzène, 2011). Cette altération se traduit généralement par une diminution du nombre de cellules qui peut entraîner des maladies telles que : la leucopénie, la thrombocytopénie, le pancytopénie et l'anémie aplasique. Néanmoins, l'hématotoxicité est également considérée comme un facteur de risques significatif pour la genèse de la leucémie, et plus particulièrement la leucémie myéloïde (cancer de la moelle osseuse) (Unité cancer et environnement, 2018).

D'autre part, il est d'autant plus nocif chez la femme enceinte car il a été démontré qu'il était capable de traverser la barrière hémato-placentaire, lui permettant d'interagir avec l'embryon pendant les phases de développement. Il est aussi retrouvé dans le lait maternel (CNESST, 2015).

En France, il existe depuis une VLEP contraignante ; c'est-à-dire que le respect de cette valeur limite est obligatoire. Elle est établie à 3,25 mg/m³ pour une exposition moyenne de huit heures, mais aucune valeur n'est déterminée pour une exposition de courte durée (INRS, FT n°49 - Benzène, 2011). Aux États-Unis, Il existe une divergence sur cette dernière valeur. Le NIOSH impose une VLCT de 3,25 mg/m³ et une VME de 0,32 mg/m³ alors que l'OSHA indique une VME de 3,25 mg/m³ et une VLCT de 15,5 mg/m³ (OSHA & NIOSH , 2018) .

(2) Effets principaux de l'éthylbenzène

Comme le benzène, l'éthylbenzène est absorbé majoritairement par la voie respiratoire mais aussi, à moindre mesure, par la voie cutanée. Sa configuration très proche de ce dernier lui confère également une toxicité importante voire similaire. Cependant, les études effectuées sur les personnes exposées professionnellement n'ont pas permis de tirer de conclusions définitives sur les effets à long terme. A chaque fois, il a été retrouvé une exposition multiple lorsque des effets sur les travailleurs étaient observés. A contrario, les expérimentations chez l'animal ont été plus concluantes. En plus du pouvoir irritant sur la peau et sur les muqueuses, la toxicité chronique chez l'animal se révèle principalement au niveau du rein. Il y a également des effets sur d'autres organes cibles impliqués comme le foie, les poumons et les testicules (chez le mâle). Enfin, vis-à-vis des études disponibles et du contraste avec les études chroniques effectuées chez l'homme, le CIRC a classé l'éthylbenzène en 2B. Malgré l'absence d'effets génotoxique et reprotoxique, l'éthylbenzène induirait le développement de tumeurs broncho-alvéolaires chez l'animal (INRS, FT n°266 - Ethylbenzène, 2018).

En France, il existe depuis une VLEP contraignante ; c'est-à-dire que le respect de cette valeur limite est obligatoire. Elle est établie à 88,4 mg/m³ pour une exposition moyenne de huit heures et pour une exposition de courte durée à 442 mg/m³ (INRS, FT n°266 - Ethylbenzène, 2018). Aux États-Unis, le NIOSH impose une VME à 435 mg/m³ et une VLCT 545 mg/m³ (NIOSH, 2018).

(3) Effets principaux du toluène

De configuration proche de celle de l'éthylbenzène, le toluène est absorbé majoritairement par voie respiratoire et par ingestion. Comme pour le benzène, le toluène est distribué dans les tissus riches en lipides et passe facilement la barrière placentaire. L'action irritante locale pour le contact cutané et pour les yeux est présente, mais n'est pas significativement prononcée. En plus des effets neurotoxiques démontrés chez les animaux adultes, des effets neurotoxiques ont également été retrouvés chez l'homme. Ce sont les effets systémiques sur le système nerveux central des travailleurs exposés qui altèrent la santé humaine.

Les relations dose-effet ont été analysées dans plusieurs études sur des volontaires exposés au toluène. Elles ont permis d'observer les effets suivants : somnolence, maux de tête et vertiges, troubles de la mémoire.

Par ailleurs, il a été observé une toxicité neurosensorielle chez les travailleurs exposés à la fois au bruit et au toluène. Même si le pouvoir cancérigène chez l'homme et chez l'animal n'a pas encore été démontré, le CIRC a quand même classé la molécule en groupe 3. Cela est notamment dû à la configuration proche du benzène et de l'éthylbenzène, mais aussi car certaines études chroniques ont induit l'augmentation de néoplasmes lymphoréticulaires chez le rat, ainsi que des adénomes de l'hypophyse. Enfin, la molécule a été classée en CMR pour sa possible toxicité pour la reproduction. En effet, elle serait impliquée dans l'augmentation du risque de fausse couche au cours de la grossesse, un retard de croissance intra-utérine, des troubles comportementaux, ainsi que le développement de syndromes proches de l'alcoolisme fœtal (avec présence de malformations observées chez l'enfant né de mère exposée) (INRS, FT n°74 - Toluène, 2012).

En France, il existe des VLEP contraignantes, établies à 76,8 mg/m³ pour une exposition de huit heures (valeur deux fois plus restrictive que les valeurs imposées par l'UE) et à 384 mg/m³ pour une VLCT (INRS, FT n°74 - Toluène, 2012). Aux États-Unis, le NIOSH a des valeurs moins restrictives : 375 mg/m³ pour une durée d'exposition moyenne et 560 mg/m³ pour une exposition de courte durée (NIOSH, 2018).

(4) Effets principaux du xylène

Le toluène est absorbé par voie respiratoire (principale voie d'exposition professionnelle), cutanée et la voie digestive, même si cette dernière n'a pas été étudiée. Les principaux effets aigus du xylène sont proches de ceux observés par le toluène ou l'éthylbenzène à savoir : troubles digestifs, céphalées, vertiges, diarrhées, vomissements, pneumopathies, irritations cutanées, irritation des muqueuses et dépression du système nerveux central (INRS, FT n°77 - Xylènes, 2009).

Les effets chroniques de cette molécule sont pour la plupart réversibles, et sont associés à des troubles du sommeil (insomnies) et des troubles de la mémoire. Ils provoquent également des dermatites d'irritation chroniques. Comme le toluène, le xylène est classé en groupe 3 par l'IARC mais à l'instar des trois autres substances citées, le xylène n'est pas classé comme CMR (INRS, FT n°77 - Xylènes, 2009).

Bien que le xylène ne soit pas CMR, le pictogramme GHS08 est imposé et peut porter à confusion. En effet, la classification fournie par les entreprises à l'ECHA dans les notifications de CLP indique que cette substance « *peut être mortelle en cas d'ingestion, pénètre dans les voies respiratoires, provoque une grave irritation des yeux, peut endommager les organes à la suite d'expositions répétées ou d'une exposition prolongée et peut irriter les voies respiratoires.* » (ECHA, 2019).

En France, il existe des VLEP contraignantes, établies à 221 mg/m³ pour une exposition de huit heures et à 442 mg/m³ pour une VLCT (INRS, FT n°77 - Xylènes, 2009). Aux États-Unis, le NIOSH a des valeurs moins restrictives : 435 mg/m³ pour une durée d'exposition moyenne, et 655 mg/m³ pour une exposition de courte durée (NIOSH, 2018).

F. Retardateur de flammes

Dans l'histoire de l'humanité, le feu a toujours été un risque prioritaire. Aujourd'hui, le risque a augmenté avec la démocratisation des produits chimiques et des appareils électriques (Dufour & Charlier, 2017). C'est pourquoi certains matériaux sont utilisés pour le diminuer voire l'empêcher : des retardateurs de flamme. Il existe plusieurs classes de retardateurs de flamme, les principales étant halogénées ou bromées. Chaque type de classe est utilisé dans différents produits comme par exemple : le canapé, la télévision, les matelas... Ils sont partout. Ces molécules, même si elles sont assez lourdes, sont classées comme très persistantes et très bioaccumulables (vPvB).

Ainsi, des traces de retardateurs de flamme sont trouvées loin de l'activité humaine (Dufour & Charlier, 2017). De plus, leurs propriétés physicochimiques sont d'excellents vecteurs pour leur toxicité. En effet, leur comportement lipophile les rend faciles à absorber et à s'accumuler dans le corps humain. D'autant plus que la faune et la flore sont par conséquent contaminées par ces polluants. De ce fait, il se crée un phénomène dit de bioamplification au travers de la chaîne alimentaire, ce qui fait que l'alimentation est la principale voie d'exposition pour la population (Marteau, 2012).

1) Toxicité des polybromodiphényléthers

Les polybromodiphényléthers (PBDE) sont une famille de retardateurs de flamme bromés composés de deux cents neuf congénères (mélanges de composés chimiques de même structure). Ces derniers sont majoritairement utilisés pour ignifuger les matières textiles ou les matières plastiques comme :

- ❖ Tétrabromodiphényléther (PBDE 47) : mousses de polyuréthane
- ❖ Pentabromodiphényléther (PBDE 99) : résines des ordinateurs et électroménagers
- ❖ Décabromodiphényléther (PBDE 209) : polystyrène des appareils électriques, tissus, rideaux

(1) Toxicités chroniques non CMR

En termes de toxicité, il est important de noter que les retardateurs de flamme pourraient présenter des effets néfastes sur plusieurs fonctions de l'organisme, comme le montrent les données. En effet, différentes études *in vivo* ou *in vitro* chez les animaux ont montré qu'ils avaient une influence sur le neurodéveloppement (Rice, et al., 2007). Ils peuvent agir en tant que perturbateurs endocriniens, notamment sur l'homéostasie des hormones thyroïdiennes ou stéroïdiennes (EFSA, 2010). Si l'exposition se produit pendant les périodes fœtales ou le développement postnatal, ses effets semblent être amplifiés, ce qui est préoccupant pour la santé (Ema, Fujii, Hirata-Koizumi, & Matsumoto, 2008). De surcroît, dans une étude épidémiologique publiée par Eskenazi et coll., il a été mis en évidence que le risque de déficits en quotient intellectuel (QI) ainsi que des troubles dans l'apprentissage sont plus élevés chez l'enfant exposé en période prénatale (Eskenazi, et al., 2013). D'autre part, les métabolites seraient responsables de certains des effets décrits, suggérant que le métabolisme chez l'être vivant conduirait à l'activation biologique des retardateurs de flamme bromés (Canton, et al., 2006).

(2) Toxicités chroniques CMR

Encore aujourd'hui beaucoup d'études sur les PBDE et leurs possibles effets CMR sont contradictoires. Néanmoins, ceux-ci sembleraient avoir des effets sur la reproduction. En effet, une récente publication de Luan et coll. suggère que l'exposition prénatale aux PBDE pourrait avoir des effets néfastes, même à faible concentration, sur le développement de la reproduction masculine (Luan, et al., 2019).

Grâce aux découvertes citées ci-dessus, deux PBDE commercialisés (tétra à penta-BDE et hexa à nona-BDE) ont été interdits dans de nombreux pays car ils ont été classés en tant que polluants organiques persistants. Même si la littérature est instructive sur la relativité pour les PBDE, des données toxicologiques supplémentaires sont encore nécessaires pour les trois retardateurs de flamme bromés restants (déca-BDE, TBBPA et HBCD).

Par ailleurs le Déca-BDE a été classé catégorie 3 par le CIRC depuis 1990 (CIRC, 1999) et il était encore classé cancérigène possible par l'US-EPA par rapport aux données animales en 1986. Il a ensuite été classé cancérigène possible pour l'homme par l'US-EPA en 2010.

En résumé

Tableau 7: Résumé des effets des polluants choisis

Famille de composé	Nom du polluant	Effets rapportés
Particules en suspension	PM ₁₀	Cancers pulmonaires, de la thyroïde Maladies cardio-vasculaire
	PM _{2,5}	Altération des voies aériennes supérieures Allergies
HAP	Benzo(a)pyrène	Cancers des poumons, broncho-pulmonaires, de la vessie, de la peau, du pharynx de l'appareil gastro-intestinal Irritation cutanée
	Naphtalène	Cancers broncho-pulmonaires Tumeurs malignes des cellules de la crête neurale (neuroblastomes) Anémie hémolytique Irritation de la peau et des yeux
COV (Aldéhyde)	Acroléine	Irritations oculaires Atteinte de l'appareil respiratoire Brûlures chimiques au niveau de la peau et des yeux. Irritations des muqueuses le long du système gastro-intestinal Affecte le système nerveux central
COV (BTEX)	Benzène	Altération du système hématopoïétique : Anémie aplasique, leucopénie, thrombocytopénie, pancytopenie Altération du système nerveux Leucémie myéloïde
	Toluène	Somnolence, maux de tête et vertiges, troubles de la mémoire Effets systémiques sur le système nerveux central Irritation locale cutanée et des yeux

COV (BTEX)	Ethylbenzène	Irritation cutanée et sur les muqueuses Tumeurs broncho-alvéolaires
	Xylène	Troubles digestifs, céphalées, vertiges, diarrhées, vomissements, pneumopathies Irritation cutanée et des muqueuses Dépression du système nerveux central
Retardateur de flamme	PBDE (47,99 et 209)	Perturbateurs endocriniens notamment sur l'homéostasie des hormones thyroïdiennes ou stéroïdiennes

Les effets des fumées d'incendies sont hautement toxiques. Outre les intoxications aiguës connues comme l'intoxication au CO provoquant l'asphyxie, ou l'intoxication aux composés dérivés de cyanure comme le cyanure d'hydrogène (HCN) provoquant l'anoxie, ou des effets thermiques engendrant des brûlures (le plus souvent respiratoires), les fumées ont également la capacité d'atteindre les systèmes cardiaque, respiratoire et neurologique. D'autre part, certains composés, comme la plupart traités précédemment, ont le pouvoir d'avoir des effets différés. C'est le cas par exemple du benzène, du naphthalène, ou des métaux lourds comme le plomb (profil toxicologique non traité dans le mémoire) qui sont des composés classés comme agents cancérigènes avérés pour l'homme. Le plus souvent, ce sont les maladies cancéreuses telles que le lymphome non hodgkinien, le cancer pulmonaire, de la prostate, testiculaire (LeMasters, et al., 2006). D'autres gaz, poussières et particules sont a priori moins toxiques. C'est le cas des PM_{2.5} PM₁₀. Néanmoins, au vu des problématiques émergentes sur la qualité de l'air, de l'augmentation des recherches scientifiques sur ces nombreux polluants ainsi que la réévaluation des molécules par les agences gouvernementales, il serait inconcevable de ne pas se préoccuper des polluants de seconde zone identifiés comme groupe 2A, 2B voire groupe 3 par le CIRC.

De manière générale, la plupart des polluants retrouvés dans les fumées sont nocifs sur le court mais également sur le long terme. Certains polluants sont même classés dans le groupe 1 par le CIRC. Pour pouvoir améliorer l'exposition des professionnels, il sera abordé dans la partie suivante les modalités d'expositions aux fumées ainsi que les protections mises en œuvre par les centres de secours pour s'en protéger.

IV. Personnels exposés

A. Équipements de Protection

La tenue vestimentaire réglementaire pour les professionnels lors d'un départ de feu est stricte. Elle se compose obligatoirement :

- ❖ D'une cagoule d'intervention
- ❖ D'un casque F1
- ❖ D'un survêtement d'intervention (ou chemise d'intervention)
- ❖ D'une veste d'intervention
- ❖ De sous-vêtements en coton
- ❖ D'un pantalon F1 (sans ceinture bouclée)
- ❖ D'un sur-pantalon d'intervention
- ❖ De chaussettes non inflammables
- ❖ D'une paire de chaussures hautes de sécurité
- ❖ D'une paire de gants d'attaque
- ❖ D'une paire de gants de déblai
- ❖ D'un ceinturon
- ❖ D'un appareil respiratoire isolant (y compris un masque de protection, un dossard, une bouteille d'air remplie au minimum à plus de 300 bars)

L'ensemble de ces équipements a pour but de protéger le sapeur-pompier pendant son intervention. Leur efficacité n'est plus à démontrer. En effet, ces équipements ont été sélectionnés sur des critères normatifs spécialement dédiés à la résistance au feu selon la norme EN11612 exigence A1, B1 et C1, à l'abrasion selon la norme ISO 12947-2 et à la déchirure amorcée selon la norme NF EN ISO 13937-2 (≥ 40 N) (DGSCGC, 2017). D'autant plus, sur feu, les EPI (équipements de protection individuelle) apparents doivent répondre à une exigence encore plus drastique : EN 469. Cette dernière classe ces EPI en catégorie 3. Elle est la plus haute catégorie et se destine à protéger des dangers mortels ou qui peuvent nuire gravement et de façon irréversible (INRS, 2013).

B. Limites des EPI

1) Port de la tenue

Malgré le standard d'exigence élevé, il subsiste des limites à l'utilisation de ces équipements. En effet, la première limite vient du fait que ces EPI doivent être portés complètement et correctement pour éviter toute entrée possible de chaleur et de fumée.

2) Capacité de la bouteille

La seconde, vient de la capacité de la bouteille d'air (FENZY®) adoptée par le SDIS (59), qui est de 6,8 litres. L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) a reporté dans son rapport (ANSES, 2014) que les travailleurs ont un débit d'air moyen de 14,8 m³ pour 8h, soit 1,75 m³/h ou 29,17 L/min. Dans ce cas, d'après la loi de Boyle-Mariotte (CF figure ci-après) l'autonomie serait alors de 70 minutes. Or couramment, lors d'un engagement, l'autonomie se situe entre 20 et 30 minutes. En revanche, en prenant cette fois-ci la valeur maximum donnée par l'ANSES dans son rapport (ANSES, 2014), elle est de 41,9 m³ pour 8h, soit 5,24 m³/h ou 87,34 L/min. En appliquant encore une fois la loi, l'autonomie serait théoriquement de 23 min.

$$P1.V1 = P2.V2 \quad \text{Loi de Boyle – Mariotte (1676)}$$

à $P_{atm} = 1\text{bar}$ et T constante : $P1.V1 = 1.V2 = \text{Volume disponible}$

On peut en déduire l'équation suivante :

$$\text{Autonomie (min)} = \frac{\text{volume disponible (L)}}{\text{débit (L/min)}}$$

3) La tenue

La troisième limite vient quant à elle de l'efficacité de la tenue de protection face aux fumées. En 2015, « *l'international association of firefighters* » (IAFF) en collaboration avec un institut de recherche américain (RTI), ont évalué l'exposition d'un sujet portant une tenue complète non neuve à un ensemble de particules, dans une enceinte confinée (RTI international, 2015). L'évaluation a été réalisée avec des particules de poudre de silice marquées avec un traceur fluorescent (méthode FAST). La taille moyenne des particules était de 2,5 µm. Les résultats sous lumière ultra-violet sont probants, comme le témoignent les figures 5 à 8 ainsi que les figures dans l'annexe n°7

La découverte la plus notable est la pénétration importante d'aérosol au niveau de la tête et du cou, indiquant une pénétration élevée de particules à travers la cagoule (CF figures n°5-8). D'autres infiltrations, moins importantes, sont également relevées notamment au niveau du buste, des jambes et des mains. Les dépôts autour de la taille suggèrent une infiltration à travers l'interface veste et sur-pantalon. De plus, la révélation de particules sur les jambes suggère une infiltration à travers l'interface entre le sur-pantalon et pantalon. Des figures représentant ce phénomène sont disponibles en annexe n°7.



Figure 5: Photographie sous UV de face avant exposition (RTI international, 2015)

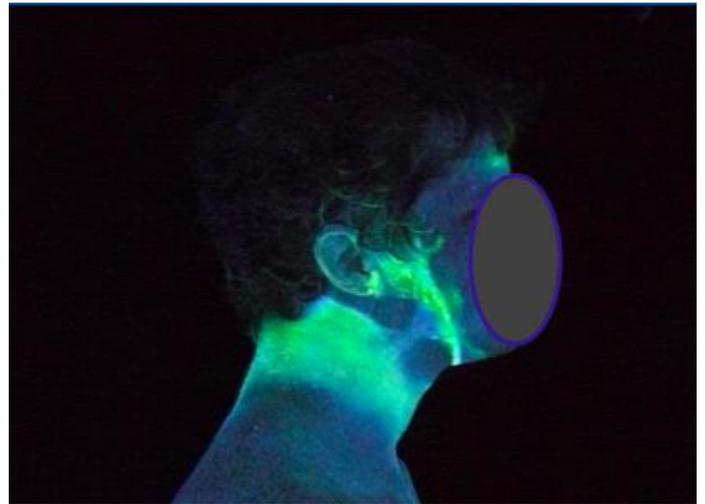


Figure 6: Photographie sous UV de face après exposition (RTI international, 2015)

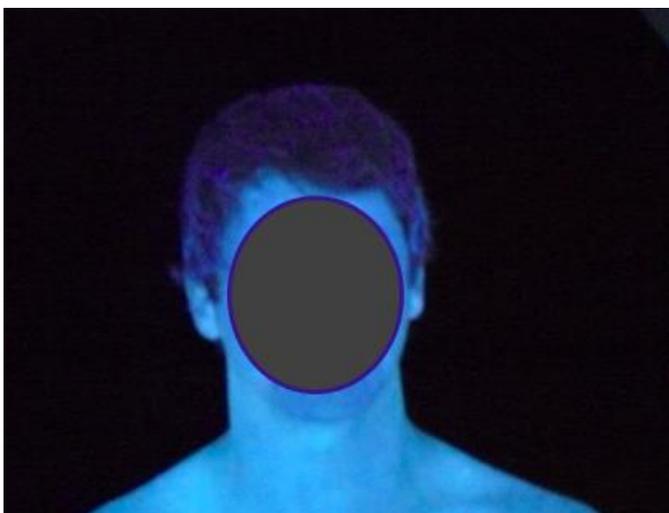


Figure 8: Photographie sous UV du côté droit avant exposition (RTI international, 2015)



Figure 7: Photographie sous UV du côté droit après exposition (RTI international, 2015)

C. Modalités d'exposition

Dans un incendie, les primo intervenants sont exposés tout au long de l'opération : du départ d'incendie au reconditionnement. De fait, les substances nocives aéroportées peuvent être absorbées selon trois voies principales :

- ❖ Par inhalation
- ❖ Par contact cutané
- ❖ Par ingestion

1) Absorption par inhalation

Tout le monde doit respirer pour survivre. En condition de stress, les pompiers ayant une capacité pulmonaire normale peuvent inhaler jusqu'à 90 voire 100 litres d'air par minute (ANSES, 2014). En ce sens, le corps d'un primo-intervenant va donc métaboliser une plus grande quantité de substances nocives qu'une personne évoluant dans un contexte moins dynamique.

Les intervenants ne sont pas tous directement confrontés aux flammes, car cela repose en partie sur le développement du feu et des techniques d'engagement décidées par le commandant des opérations de secours (COS). Généralement, seuls quelques binômes s'engagent pour lutter contre le foyer. Ces personnels sont protégés des fumées pendant la phase d'attaque car ils sont obligatoirement capelés. Cependant, les binômes d'alimentation et le chef d'agrès, (responsable de l'équipage) qui ne sont pas confrontés directement au feu, portent l'ensemble de leur tenue. Ils ne sont toutefois pas capelés. Par souci de praticité, il est toléré que les conducteurs des véhicules soient les seuls à ne pas porter leurs ARI.

Souvent, ces professionnels doivent faire face à des situations changeantes (tel que le changement brusque de sens du vent). Par conséquent, les fumées peuvent directement exposer les personnels non capelés. Pour y faire face rapidement, il n'est pas rare que les pompiers utilisent des solutions simples (respiration dans le pli du coude, dans leurs col, blocage de la respiration, respiration uniquement par le nez ...) qui malheureusement ne fournissent pas une protection adéquate. Aucune de ces méthodes n'est particulièrement efficace. Elles peuvent être considérées comme irrationnelles et représentent un réel problème. Enfin, le déblai est l'une des étapes où les pompiers sont particulièrement exposés aux polluants, cette étape est parfois effectuée par certains personnels sans ARI ni même de masque filtrant.

2) Absorption par contact cutané

De nombreux médicaments sont représentés sous forme de crème. Ils sont conçus pour être absorbés par la peau, pour atteindre ensuite la circulation sanguine et ainsi être métabolisés afin de délivrer leur principe actif.

De la même manière, les molécules nocives présentes dans l'air et dans les fumées peuvent pénétrer puis être métabolisées quand elles entrent en contact avec la peau. De nombreuses situations pendant une intervention amènent donc la peau des pompiers à être confrontée à des polluants.

Tout d'abord, ceux-ci s'exposent à cette voie chaque fois qu'ils se touchent la peau avec des mains contaminées ou avec des gants ayant été en contact avec des débris de feu, des équipements, du matériel pollué etc. De surcroît, lorsque les pompiers sont situés dans un environnement enfumé et qu'une zone de peau est exposée, les particules des gaz de combustion entrent en contact avec celle-ci. S'ajoute à cela le problème lié aux limites d'efficacité des EPI, où il a été observé précédemment qu'il subsiste une pénétration de particules à certains endroits, et ce, malgré le port complet de la tenue.

3) Absorption par ingestion

Les polluants dégagés sur la scène d'un incendie ne peuvent pas tous être détectés par nos sens. D'une part, certaines situations qui à première vue ne sont pas perçues comme dangereuses sont facilement négligées. C'est ainsi, quand les mécanismes d'alertes naturelles tels que la toux, l'odeur ou bien le goût ne réagissent pas de manière instinctive, qu'il est « normal » pour ces professionnels de ne pas utiliser leurs dispositifs de protection respiratoire. Cela rend la situation d'autant plus perfide.

C'est en grande partie pour cette raison que les pompiers ont tendance à ingérer les particules nocives par l'intermédiaire des voies respiratoires supérieures, acheminées par le mucus et la salive dans le système digestif.

D'autre part, il est également possible pour ces professionnels d'ingérer des substances nocives, notamment lors de longues interventions. En effet, lorsque se profile une intervention de longue durée, il est courant que les personnels ayant consommé une très grande partie de leur énergie et de leur bouteille d'air se reconditionnent. De fait, des équipes de soutien s'installent dans des zones où les fumées ne sont peu voire pas présentes, mais assez proches tout de même des véhicules d'interventions. Afin de rendre les pompiers de nouveau opérationnels, sont distribués :

- De l'eau pour se réhydrater
- Des encas pour retrouver de l'énergie
- Des nouvelles bouteilles d'air.

De manière générale, les pompiers n'ont pas la possibilité de changer de vêtements, ni de se laver ou de placer la nourriture dans un endroit propre. Le personnel souvent éprouvé et moins lucide se déséquipe à proximité, change sa bouteille d'air, et vient par la suite s'alimenter. Les aliments sont donc souvent consommés sur le lieu de travail avec les équipements et les mains contaminées. Par conséquent, lorsque les pompiers se réalimentent, ces derniers ingèrent des substances nocives par le biais du contact main-bouche et main-alimentation.

V. Méthodologie

A. Problématique

La problématique traitée dans ce mémoire est axée sur l'exposition aux fumées d'incendie.

Comment améliorer l'évaluation des risques liés à l'exposition professionnelle aux fumées d'incendies ?

Étant donné la diversité des polluants auxquels sont confrontés les acteurs de la lutte contre l'incendie dans les fumées d'incendie, il reste difficile de connaître précisément quels sont les polluants qui émanent de l'incendie et des fumées. Dans ce mémoire, de nombreux polluants n'ont pas été pris en compte. Nonobstant, les polluants décrits sont souvent rencontrés mais peu connus de bon nombre de sapeurs-pompiers. Le but est d'alerter et d'informer quant à la nocivité de certains d'entre eux. L'ensemble des informations traitées a pour objectif de donner des éléments de réponse à cette problématique et de savoir si les démarches actuelles sont suffisantes pour protéger les pompiers.

B. Méthodologie

Après avoir entrepris et complété l'analyse bibliographique de certains composés, de leur diffusion, de leur toxicité et de leur exposition, il a été décidé, afin d'améliorer et de connaître précisément l'exposition des professionnels, de dresser un état des lieux.

Pour ce faire, un questionnaire a été élaboré étroitement grâce à l'appui d'anciens sapeurs-pompiers, de mes connaissances pratiques et théoriques acquises à la Brigade de sapeur-pompiers de Paris (BSPP) et au service départemental d'incendie et de secours du Nord (SDIS).

L'enquête a été présentée dans deux casernes de deux régions distinctes :

- ❖ L'une située dans le Nord : la caserne de Lille-Littré
- ❖ L'autre située en Ile de France : la caserne de Vincennes.

Cette enquête confidentielle a reçu l'accord de diffusion par le Lieutenant-Colonel DUBOIS, Responsable du groupement santé et sécurité en service au SDIS 59 et du Chef de 2^{ème} groupement d'incendie de secours (GIS) de la BSPP.

Pour commencer, le choix de ces deux casernes se justifie par le fait qu'elles sont, d'un point de vue organisationnel et géographique, à la fois semblables sur bien des aspects, mais également très différentes d'un point de vue organisationnel. En effet, la caserne de Lille-Littré compte environ 86 personnels (dont 63 professionnels et 23 volontaires) et dirigée par un service public. La caserne de Vincennes est quant à elle, une institution d'élite rattachée à l'Armée de Terre. D'autre part, la caserne de Lille-Littré propose un protocole de déséquipement après incendie, tandis que la caserne de Vincennes n'en propose pas. Cette information permet d'observer une possible divergence de procédé existant sur une problématique commune au sein d'un même territoire.

Le questionnaire a été composé selon un schéma précis divisé en trois parties :

- ❖ En premier lieu sont recueillies les données dressant un constat sur le niveau de connaissance des interrogés envers l'exposition des fumées d'incendie.
- ❖ En second lieu, un questionnement multiple est demandé envers les moyens de protection utilisés.
- ❖ En dernier lieu, le questionnaire recueille les réactions afin d'amener des pistes d'amélioration pour diminuer l'exposition des pompiers par cette fumée.

Sa diffusion a été réalisée respectivement par chacun des chefs de centre par le biais d'un lien et d'un QR-code. Le questionnaire vierge est disponible en annexe n°8.

C. Analyse des résultats

1) Contexte

Étant donné que peu de données existent dans la littérature pour ce type d'étude, il sera difficile de comparer les chiffres et les résultats présentés par la suite.

Premièrement, le questionnaire a été diffusé pendant 2 mois dans la caserne de Lille-Littré. Le taux de répondants est légèrement inférieur à 86%. Parmi eux, 90% ont répondu de manière complète, permettant ainsi que leurs réponses soient exploitées (CF tableau n°7).

Tableau 8: Taux de Participation et d'exploitation du questionnaire

Effectif théorique	Nb de répondant	Taux de participation
56	48	86%

Questionnaire entièrement complété	Questionnaire partiellement complété	% de questionnaires exploitables
48	43	90%

Afin d'établir un profil des personnes ayant répondu, il a été demandé de déclarer le nombre d'années en service.

La figure n°9 représente la répartition de l'âge des sapeurs-pompiers ayant répondu. La moyenne est de 10 ans d'ancienneté, l'amplitude des valeurs va d'un minimum d'un an de service jusqu'à un maximum de 37 ans.

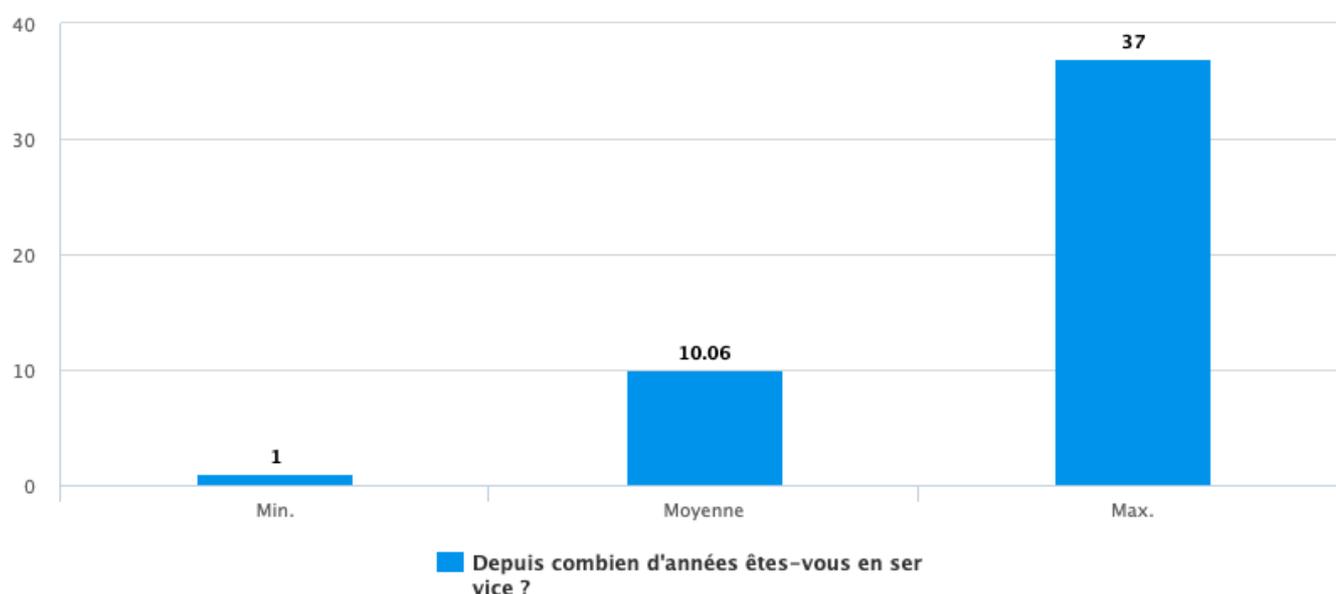


Figure 9: Histogramme de la répartition de l'âge des répondants

2) Sensibilisation et perception du risque (question n°2 à 7)

❖ Question n° 2

Globalement, seuls 26% des interrogés semblent réellement avoir assez d'informations sur les impacts des fumées d'incendie. En revanche, plus des deux tiers considèrent avoir un besoin d'informations supplémentaires.

Tableau 9: Répartition des réponses de la question n°2

Q2/ Estimez-vous être assez sensibilisé(e) aux impacts des fumées d'incendie ?	Nb.	%
1) Oui complètement	11	25.58%
2) Oui mais à approfondir	14	32.56%
3) Non pas assez	16	37.21%
4) Non pas du tout	2	4.65%
Total	43	100%

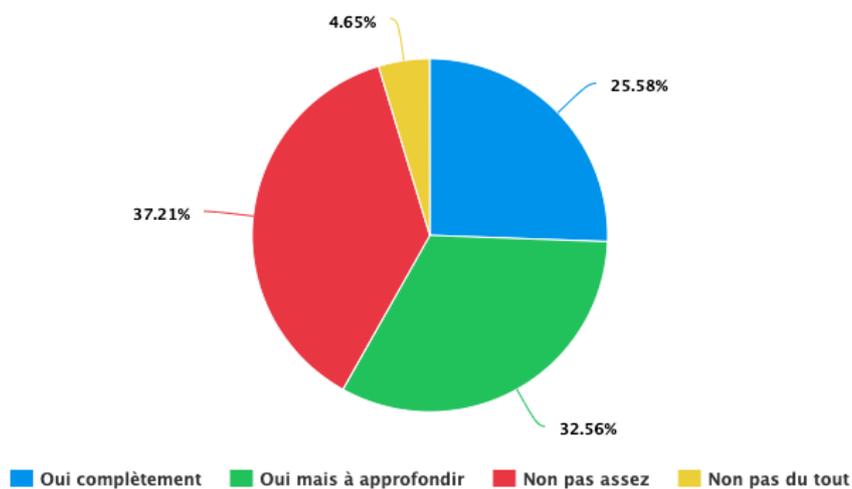


Figure 10: Diagrammes circulaires du pourcentage des réponses reçues à la question n°2

Question n°3

A la question trois, un tiers des personnes interrogées indique ne pas savoir quels sont les principaux polluants.

Tableau 10: Répartition des personnes sensibilisées aux polluants présents dans les fumées

Q3/ Savez-vous quels sont les polluants que l'on retrouve principalement dans les fumées d'incendie ?	Nb.	%
1) Oui	27	62,79%
2) Non	16	37,21%
Total	43	100%

Question n°4

De plus, afin d'obtenir un degré d'information supplémentaire, il a été demandé aux personnes ayant répondu par l'affirmative d'inscrire les polluants principaux retrouvés.

Logiquement, on retrouve le plus souvent cité le CO, puis à mon grand étonnement viennent l'HCN et la vapeur d'eau. Le CO₂, les particules fines et les hydrocarbures complètent le podium avec seulement 3 à 4 citations.

Seule une personne, dans une même réponse, a indiqué la présence de SOx et NOx.

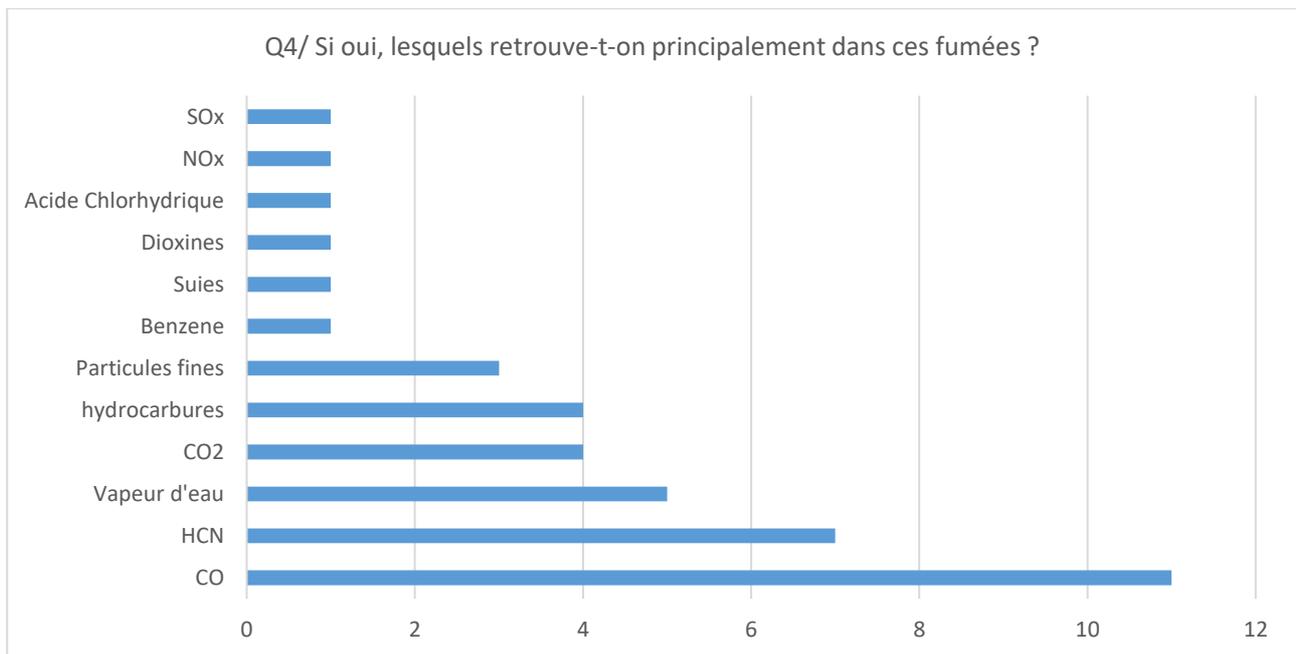


Figure 11: Fréquences cumulées des polluants principaux cités

Question n°5

Un peu plus de 10% des participants ne connaissent pas les impacts que peuvent avoir les polluants dans les fumées d'incendie sur la santé.

Tableau 11: Répartition des personnes en fonction de leur connaissance sur l'impact sanitaire des fumées

Q5/ Mise à part la mort par asphyxie, connaissez-vous d'autres impacts potentiels des fumées d'incendie sur la santé ?	Nb.	%
1) Oui	38	88,37%
2) Non	5	11,63%
Total	43	100%

Question n°6

Comme pour la question n°4, cette question permet de recueillir des informations supplémentaires. Les personnes ayant répondu par l'affirmative ont cité majoritairement le cancer comme impact potentiel. Ensuite, ce sont les maladies respiratoires telles que la bronchopneumopathie chronique obstructive (BPCO), les brûlures et les maladies neurologiques qui sont citées.

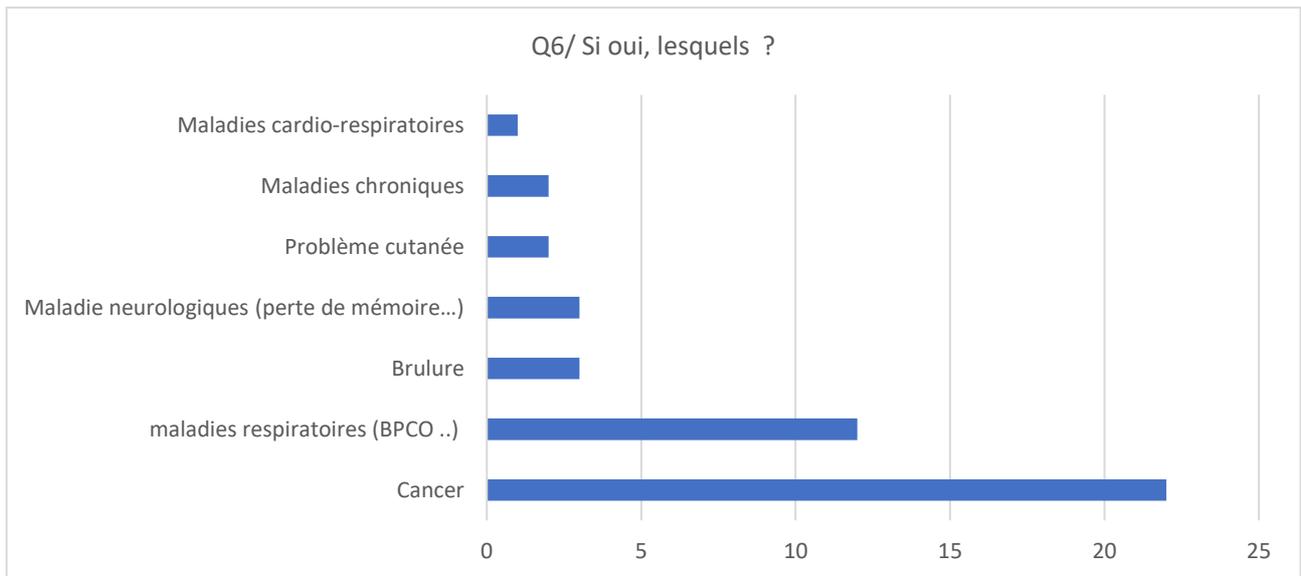


Figure 12 : Fréquence cumulée des impacts potentiels sur la santé aux fumées cités par les participants

Question n°7

Les répondants sont unanimes, les protections dont ils disposent afin de se protéger contre les fumées sont les EPI et plus précisément l'appareil respiratoire isolant (ARI). Quelques répondants ont affiché également le port du masque *Filtering Facepiece Particles 2 et 3 (FFP2 et FFP3)*.

3) Perception du risque

La perception du risque a été implicitement questionnée grâce aux séries de questions présentées dans le tableau n°12. Ces données sont présentées de manière condensée afin de pouvoir extraire, si possible, une tendance générale.

Tableau 12: Représentation condensée des questions rapportant à la perception du risque

Q8/ Existe-t-il une procédure de « déséquipement » ?	Nb.	%
1) Oui	31	72,09%
2) Non	6	13,95%
3) Pas à ma connaissance	6	13,95%

Q9/ Existe-t-il une procédure de nettoyage / dépollution d'un véhicule engagé ?		
1) Oui	6	13,95%
2) Non	25	58,14%
3) Pas à ma connaissance	12	27,91
Q10/ Existe-t-il des procédures de dépollution du personnel ?		
1) Oui	29	67,44%
2) Non	9	20,93%
3) Pas à ma connaissance	5	11,63%
Q11/ Vous douchez-vous systématiquement au retour à la caserne ?		
1) Oui	29	67,44%
2) Non	14	32,56%
Q12/ Lavez-vous votre masque ?		
1) Oui, systématiquement	31	72,09%
2) Oui, parfois	10	23,26%
3) Non, jamais	2	4,65%
Q14/ Lavez-vous votre dossard ?		
1) Oui, systématiquement	10	23,26%
2) Oui, parfois	19	44,19%
3) Non, jamais	14	32,56%
Q16/ Changez-vous de tenue d'incendie systématiquement (veste + pantalon) ?		
1) Oui	14	32,56%
2) Non	29	67,44%
Q19/ Changez-vous votre cagoule systématiquement ?		
1) Oui	11	25,58%
2) Non	32	74,42%
Q21/ Changez-vous vos gants ?		
1) Oui	4	9,30%
2) Non	39	90,70%
Q23/ Selon vous, à la prise de poste, le rasage doit-il être systématique ?		
1) Oui	31	72,09%
2) Non	12	27,91%
Q25/ Estimeriez-vous utile d'être informé des dernières données concernant la toxicité des fumées d'incendie ?		
1) Oui	39	90,70%
2) Non	4	9,30%

Les résultats obtenus permettent effectivement de révéler une tendance générale. En effet, la plupart des réponses obtenues se répartissent selon un axe deux-tiers un tiers.

Seules les questions 9 et 21 ne respectent pas cette tendance. Néanmoins, lorsque cette dernière n'est pas respectée, une autre se dessine, très tranchée.

En résumé

D'après les réponses, nous pouvons observer :

- ❖ Qu'il existe des procédures de dépollution et de « déséquipement » du personnel engagé, mais pas de protocole de nettoyage de véhicule.
- ❖ Que les deux tiers des personnes indiquent qu'ils lavent systématiquement leur masque avec protocole spécifique, mais pas systématiquement leur dossard. Généralement, ce sont la brosse, de l'eau et de l'huile de coude qui sont utilisés.
- ❖ Que ces sapeurs-pompiers se douchent systématiquement après l'opération. En revanche, ils ont tendance à ne changer ni leur veste, ni leur sur-pantalons, ni leur paire de gants, ni leur cagoule.
- ❖ Que globalement, le port de la barbe ne doit pas être admis.
- ❖ Qu'ils aimeraient, unanimement, recevoir régulièrement des informations concernant la toxicité des fumées.

4) Divergence avec la caserne de Vincennes

La participation à ce même questionnaire a été moins élevée au sein de la caserne de Vincennes. Cette caserne compte soixante et un sapeurs-pompiers. Trente personnes ont répondu, ce qui correspond à un taux de participation de 51,6%. Parmi eux, vingt-six l'ont pleinement complété. Le taux de questionnaires exploitables est de 83,8%.

Premièrement, la sensibilité des questionnés vis-à-vis de la toxicité des fumées et des polluants retrouvés est moins probante. En effet, 92% indiquent ne pas être assez sensibilisés et 46% ne connaissent pas les principaux polluants des fumées.

Les réponses obtenues sur les protocoles demandés sont négatives. En revanche, les sapeurs-pompiers de cette caserne lavent leur masque et leur dossard de manière presque systématique : aucun n'a répondu par la négative. De surcroît, ces derniers indiquent se doucher systématiquement au retour d'incendie. Similairement à la caserne de Lille-Littré, les répondants indiquent ne jamais changer leur veste, leur sur-pantalons ni leur paire de gants. En revanche la cagoule est changée une fois sur deux.

En comparaison à la caserne de Lille-Littré, les résultats au sein de la caserne de Vincennes sont moins contrastés. Cependant, mis à part les résultats cités, les réponses sont généralement similaires entre les deux sites.

D. Interprétation des résultats

1) Les résultats

L'analyse de la présente recherche révèle que les hommes et les femmes de ce corps de métier national, civil ou militaire, adoptent des comportements malgré tout assez proches. Cela permet d'ouvrir la recherche à des améliorations simples et confirme en partie l'hypothèse de cette étude : les protocoles devraient être homogènes quelles que soient les casernes.

Il est à noter que les sapeurs-pompiers connaissent les principaux polluants et les impacts sanitaires que peuvent avoir les fumées d'incendies. Pourtant, la grande majorité de ces personnes disent ne pas connaître suffisamment la toxicité des polluants principaux. Par ailleurs, sur l'ensemble des réponses obtenues, seulement très peu de personnes ont cité les particules fines, les hydrocarbures et les dioxines. Aucune personne n'a cité la famille des COV ou des COSV, même si l'une d'elle a nommé une molécule faisant partie de cette famille de composés. Pourtant, cette dernière est retrouvée de manière systématique. Les hydrocarbures ont été cités. Là encore, cette famille de composés est très voire trop vaste, pour savoir quels composés se cachent derrière. La plupart des revues scientifiques citées dans les paragraphes précédents mettent l'accent sur les nombreux HAP qui émanent des fumées. La réponse est donc correcte, mais nécessiterait plus de précisions. En revanche, l'HCN et ses dérivés sont bien connus de ces interrogés, parfois même davantage que le CO₂. Si le CO₂ n'occupe pas la première ni même la seconde place, cela peut s'expliquer par le fait qu'il est tellement évident, que les participants oublient de le citer.

L'interprétation des résultats de la seconde partie du questionnaire est plus contrastée, du fait notamment des choix effectués et justifiés dans les précédents paragraphes.

Même si pour la caserne de pompiers de Lille-Littré les résultats sur les protocoles sont probants, il n'en demeure pas moins qu'il reste des personnes qui n'ont à priori, pas connaissance de certains protocoles, comme ceux du déshabillage ou de la dépollution. Toutefois, en analysant les questionnaires, certains indiquent cependant qu'il existe effectivement un protocole de « déséquipement » ou un protocole de dépollution. Le protocole de dépollution vient à la suite du protocole de « déséquipement ». Ces derniers sont nouveaux, et ont vu le jour au quatrième trimestre de l'année 2018 (SDIS 59, 2018).

Concernant la procédure de nettoyage d'un véhicule engagé, celle-ci n'existe pas. Pourtant, six personnes ont répondu par l'affirmative.

Le nettoyage et la désinfection des équipements portés sur intervention sont bien encadrés par les directives et protocoles. Logiquement, chaque personne ayant utilisé ces équipements doit les rendre propres du point de vue esthétique mais aussi hygiénique. C'est la raison pour laquelle le nettoyage s'effectue conformément au protocole mis en place dans les différentes casernes. Afin de nettoyer ces équipements, on utilise généralement de l'eau, une brosse et une solution désinfectante selon cet ordre :

- ❖ Lessivage, rinçage, désinfection (trempage pendant 15 minutes), rinçage et séchage.

Malgré l'ensemble de réponses correctes, quelques personnes ont indiqué utiliser uniquement des lingettes, de l'eau ou du spray désinfectant. Cela permet de mettre en évidence qu'il existe des erreurs d'application entre la théorie et la pratique.

Les questions posées sur la dépollution du personnel et des équipements sont, à mon sens, inquiétantes. Seule une minorité change ses EPI en rentrant d'intervention. La plupart garde sa veste et son sur-pantalon, probablement très pollués au retour d'incendie, pour le prochain départ. On peut donc en déduire qu'au fur et à mesure des interventions pour départ de feu avéré, l'ensemble de la tenue absorbe davantage de polluants.

Non seulement la veste et le sur-pantalon ne sont pas systématiquement changés, mais la cagoule ne l'est pas non plus. D'après les réponses obtenues, seule une personne sur deux change sa cagoule après un incendie, alors que celle-ci fait partie des équipements que les particules traversent le plus. Lors de mon incorporation à la BSPP, le changement de cagoule après un incendie était conseillé mais n'a jamais été obligatoire. En revanche, la douche était, elle, bien forcée. C'est pourquoi les personnels de la BSPP ont quasiment tous répondu de manière positive.

2) Amélioration

(1) La formulation de l'étude

Tout d'abord, il est nécessaire de comprendre pourquoi mon choix s'est porté sur ces deux casernes. Cela n'est absolument pas le fruit du hasard. De manière à connaître le contexte de la meilleure manière possible et pour obtenir une étude approfondie, j'ai choisi la caserne dans laquelle mon frère, ancien sapeur-pompier de Paris avec 7 années de service, est caporal. En ce qui concerne la caserne de Vincennes, il s'agit de la caserne dans laquelle je suis sapeur-pompier réserviste depuis près d'un an.

Cependant, malgré ce choix orienté de manière subjective, je tenais compte de réelles motivations objectives car elles remplissaient tous les critères nécessaires à la bonne tenue de mon étude. Néanmoins, à l'heure de la conclusion des résultats obtenus, je pense qu'il aurait été plus judicieux de comparer deux entités de même nature, plutôt que de comparer une caserne militaire et une caserne civile qui ont par essence, deux fonctionnements différents. Les résultats auraient certainement été plus justes à comparer, et donc plus pertinents.

Malgré le fait que le questionnaire ait été transmis aux sapeurs-pompiers par l'intermédiaire des chefs de centre, je suis cependant satisfait de l'implication des répondants et du nombre de réponses obtenues. J'ai ainsi pu en tirer des résultats satisfaisants basés sur des avis de qualité plutôt que de quantité. Il faudrait un nombre beaucoup plus important de réponses pour obtenir des résultats significatifs. L'échantillon interrogé ne m'a pas permis de constituer de véritables statistiques, mais m'a apporté certains éléments de réponses aux questions soulevées tout au long de ce mémoire. Il faudrait bien évidemment approfondir l'étude, mais sa conclusion est néanmoins encourageante.

Néanmoins, il faut rester prudent lors de ce type de questionnaire, car les sapeurs-pompiers interrogés répondent selon leur expérience, leur connaissance des protocoles, et leur manière de travailler. Il faut tenir compte de ces facteurs pour prendre du recul et ne pas en tirer de résultats trop hâtifs. C'est le cas par exemple d'une question posée au personnel de la BSPP à propos des protocoles de déséquipement. Quelques personnes ont répondu par l'affirmative à la question de l'existence d'un protocole, alors qu'il n'en existe aucun.

Par ailleurs dans l'analyse, plusieurs questions n'ont pas été abordées. Elles ont été posées afin de connaître les pratiques de ces différents centres de secours. En effet, même si leurs protocoles et leurs statuts sont différents, il n'en demeure pas moins qu'ils exercent les mêmes métiers avec les mêmes EPI (de marques différentes). Les réponses collectées à ces questions annexes à propos de la manière dont le personnel lave ses tenues d'incendie (vêtements) n'ont pas pu être exploitées. En effet, aucune tendance ne pouvait être dégagée. La formulation d'une réponse a peut-être pu induire en erreur certains participants. En proposant une machine professionnelle, il était question d'une machine ayant les propriétés et la capacité adaptée à un usage de masse, ainsi que les additifs allant de pair.

En questionnant certaines personnes, je me suis rendu compte que la réponse portait à confusion car dans chaque caserne, il est mis à disposition du personnel des machines à laver lambda non adaptées à l'usage collectif. La question des termes employés au sein d'une étude a donc toute son importance.

Le choix du type de question utilisé est également primordial, ainsi que sa formulation. Il faut arriver à obtenir des résultats intuitifs sans jamais orienter le répondant (sauf si on aimerait développer sa réflexion, mais en aucun cas il est possible de l'orienter dans sa réponse). Par exemple, à la question sur les principaux polluants que l'on retrouve dans les fumées d'incendies, j'ai été très surpris des réponses. Les sapeurs-pompiers ont exprimé certains polluants spécifiques avant d'évoquer les plus connus. Comment interpréter ce résultat ? Les doutes n'auraient pas trouvé leur place si j'avais évoqué le CO₂ ainsi que d'autres polluants connus de tous directement dans la question pour les éliminer du champ de réponses possibles.

Le temps imparti est également un facteur à prendre en compte. J'ai diffusé le questionnaire pendant une période de deux mois, à 147 personnes. Le temps moyen de réponse est évalué à 7 minutes, pouvant être interrompues compte-tenu de la nature du travail des répondants. Ce facteur peut freiner les répondants, et conduire à obtenir des réponses incomplètes et non-approfondies. Par ailleurs, le téléphone personnel est beaucoup moins toléré à la BSPP que dans le milieu civil, du fait qu'il s'agit d'une brigade militaire, donc très règlementée.

Enfin, il faut tenir compte du fait que les interrogés du SDIS de Lille-Littré n'exercent pas le métier de sapeur-pompier de la même manière. Certains sont volontaires et d'autres professionnels. Aucune distinction n'a été faite lors de l'élaboration du questionnaire, ni de son analyse, alors que les réponses peuvent être directement impactées. Leur pratique ne se base pas sur le même nombre d'années de services, ni sur la même amplitude horaire et donc, pas sur la même quantité d'interventions. Enfin, il se peut que certains interrogés n'aient jamais pratiqué d'intervention sur feu, mais uniquement en secours à victime. La distinction n'a pas été faite car le sujet est classé comme sensible par le SDIS et par la BSPP, et se trouve donc couvert d'anonymat. J'ai dû m'entretenir et défendre mon projet avec le Lieutenant-Colonel DUBOIS pour diffuser mon questionnaire à la caserne de Lille-Littré, et attendre l'autorisation du chef du deuxième GIS pour sa diffusion à Vincennes.

Malgré ces contraintes, les résultats obtenus permettent de donner une première approche à mon sujet, et de sensibiliser les sapeurs-pompiers à la problématique abordée tout au long de ce mémoire.

Cette étude m'a permis de soulever des axes possibles d'amélioration de l'existant, notamment par la question ouverte 26 portant sur les suggestions des sapeurs-pompiers à propos des moyens d'amélioration de la prévention sur la toxicité des fumées d'incendies. En effet, qui mieux que les premiers impactés pour trouver une solution acceptée et acceptable à cette problématique ? Après étude de ces réponses, celles-ci convergent toutes vers 3 points-clés :

- L'information et la formation plus étendues, plus approfondies et plus régulières
- Les moyens matériels et financiers pour mettre en pratique les bons usages
- Une réglementation plus définie rendant ces bonnes pratiques obligatoires

(2) Les axes d'amélioration afin de réduire l'exposition

La Formation

La formation est nécessaire auprès des premiers concernés, les sapeurs-pompiers. En obtenant des informations sur les risques qu'ils encourent au quotidien, en y étant sensibilisés et en étant formés régulièrement aux bonnes pratiques, ils se sentent davantage entendus et protégés par l'institution qu'ils ont choisi de servir. Leur état de santé sur le long terme s'en trouverait également directement impacté. Seules 11 personnes sur 69 interrogés se disent parfaitement sensibilisées au sujet.

L'image héroïque des pompiers souillés au feu est idéalisée. Il faut faire prendre conscience que ceux-ci risquent leur vie au quotidien, à court et à long terme, non seulement à cause de l'intervention en elle-même, mais aussi à cause de tout ce qu'elle engendre. Un pompier qui porte correctement ses équipements, qui est formé aux risques qu'il encourt et qui en connaît les enjeux laissera moins de traces sur son visage.

Il faut par ailleurs également poursuivre la prévention sur le tabac, qui a des effets similaires à court et long terme. Un pompier qui fume et qui est exposé aux fumées aura un facteur de risques supplémentaire de développer une maladie à long terme (cardio-vasculaire, respiratoire ou cancer) qu'un pompier non-fumeur.

Le fait d'être informé est une première étape clé à l'amélioration de ces conditions au quotidien. Mais il faut également être en mesure de mettre la théorie en pratique. Les moyens matériels et financiers sont donc indispensables.

Les moyens

Il faut s'équiper pour mieux faire face aux fumées. Pour cela, la première préconisation que je pourrais apporter est de rendre obligatoire le changement de cagoule après chaque incendie. Si possible, acquérir et tester de nouvelles cagoules plus performantes venant non pas s'intégrer sous le masque ARI mais autour, pour une étanchéité et une imperméabilité plus performantes.

Les tenues ne sont pas les seules concernées par la toxicité. Il est également nécessaire de décontaminer tout le matériel inhérent à l'intervention, y compris le véhicule. Il n'est pas possible de le faire de manière approfondie, mais il faut éviter de remettre du matériel sale dans un véhicule censé être propre. Pour cela, les fenêtres du véhicule doivent être fermées afin de proscrire toute pollution. Pour éviter de polluer le véhicule, le Canada et la Suède préconisent de ranger tous les équipements utilisés dans des sacs hermétiques transportés de manière séparée.

Par ailleurs, ces derniers conseillent également de procéder à une dépollution sommaire avant de quitter le site de l'intervention, dans le but de retirer le plus de polluants possibles (poussière et suie). Cette dépollution s'exécute avec les moyens dont dispose les sapeurs-pompiers sur place, c'est-à-dire avec la lance à incendie (régulé évidemment avec un faible débit).

Il faudrait enfin doter les personnes d'une tenue intégrale supplémentaire allant de la cagoule aux bottes de feu. Il faut également définir des standards permettant aux pompiers qui rentrent d'intervention de changer leur tenue d'incendie (sur-pantalon et veste). Le SDIS 59 a permis une première approche de ce changement par la mise en place d'une trousse suie-incendie permettant aux sapeurs-pompiers de se déséquiper et de se dépolluer grossièrement sur les lieux de l'intervention. Cependant, les circonstances ne sont pas toujours propices et les conditions peuvent parfois rendre cette décontamination difficile : l'état de fatigue des sapeurs-pompiers après intervention, l'environnement alentour après un incendie, la visibilité en cas d'intervention de nuit... De ce fait, d'autres protocoles spécifiques à ce genre de situation doivent être établis.

Réglementation

Une réglementation bien définie semble également nécessaire aux sapeurs qui ont répondu au questionnaire. Un protocole leur permettrait d'acquérir la méthodologie à employer après une intervention.

Afin de pallier aux contraintes météorologiques, une zone dédiée aux camions et aux personnes intervenues doit être définie, ainsi qu'une zone sale et une zone propre. Le but est d'éviter une contamination croisée lors du protocole de déshabillage. De plus, il faut dépolluer la cabine du véhicule utilisé car celle-ci est actuellement souillée par les sapeurs-pompiers et leurs équipements de manière continue. L'atmosphère est donc constamment polluée, exposant d'autant plus les professionnels. Je préconiserais donc d'établir un protocole de dépollution de la cabine et de l'appliquer après chaque retour d'incendie.

Il est également primordial que les professionnels se douchent après une intervention. Il faut rendre cette pratique obligatoire, au même titre que le lavage des équipements doit être systématique : le masque, le dossard et la bouteille. Ce lavage doit s'effectuer avec le port complet d'EPI (masque FFP3, gants nitrile, tenue à manches longues) pour éviter le contact cutané et l'inhalation de polluants remis en suspension.

En instaurant une certaine réglementation, expliquée au préalable, les bonnes pratiques seraient appliquées par tous, puisqu'elles seraient comprises et rendues obligatoires.

VI. Conclusion et perspectives

Les fumées d'incendie sont une problématique qui, depuis deux ans, commence à prendre de plus en plus d'ampleur en France, notamment dans le SDIS du Nord. En effet, afin d'améliorer les conditions d'exposition des sapeurs-pompiers, ce SDIS a créé un groupe de travail de plusieurs personnes très impliquées sur ce sujet. Par ailleurs, la trousse suie-incendie a été déployée à la suite de ce groupe de travail.

Étant moi-même issu d'une formation à la BSPP et au SDIS, j'ai choisi d'approfondir l'étude des polluants retrouvés de manière systématique dans différents types de feu. Aujourd'hui, un grand nombre de publications concernent les fumées d'incendie de forêt. Toutefois, les expériences de camarades ainsi que mes expériences professionnelles me permettent de souligner le fait que la plupart des départs de feu auxquels sont confrontés les sapeurs-pompiers des Hauts de France sont des incendies urbains (appartements, maison, voiture...). Les fumées de ces feux, qu'ils soient urbains ou de biomasse, sont malheureusement trop peu étudiés en France. C'est la raison pour laquelle j'ai entrepris d'étudier ces différents types afin de mettre en exergue leurs subtilités en partant du principe qu'une meilleure connaissance sur une problématique permet de mieux la comprendre et donc de pouvoir identifier les dangers et d'implanter des actions nouvelles dans le but de faire diminuer le risque.

Les sapeurs-pompiers sont souvent le dernier espoir pour certaines victimes prises au piège d'un incendie. Ce métier est un métier de terrain. Ainsi, la plupart des personnes confrontées à un feu peuvent sous-estimer les effets chroniques qu'ont une majorité des polluants présents dans les fumées. Effectivement, les polluants dans ces fumées ne sont malheureusement pas visibles et se déposent sur les équipements, sur les mains, sur les visages et sur les camions de l'ensemble des intervenants sur feu.

C'est pour cette raison qu'il a été décidé d'étudier des polluants généralement peu connus de ce corps de métier. Le choix a été réalisé en parallèle des réponses obtenues aux questions n°3 et 4 de l'enquête réalisée. Et de sorte à faire prendre davantage conscience des dangers liées à l'exposition répétée aux fumées, l'étude toxicologique s'est portée exclusivement sur la toxicité chronique de chaque polluant sélectionné.

En ce sens, des enquêtes épidémiologiques montrent que le métier de sapeurs-pompiers devient de plus en plus dangereux, notamment à cause de l'usage massif de plastiques, de retardateurs de flammes, d'électronique ...

La toxicologie est capable d'étudier le devenir de chaque polluant dans le corps et dans l'environnement. Or, en intervention les pompiers sont en contact avec des dizaines de polluants classés dans le groupe 1, 2A et 2B par le CIRC. La combinaison de ces produits chimiques pourrait accroître le risque de développer une maladie chronique : cette hypothèse est rendue possible par des effets synergiques. En toxicologie, on entend par synergie l'effet provoqué lorsque l'exposition à deux ou plusieurs produits chimiques a des effets sur la santé supérieure à la somme des effets de chaque produit chimique ; soit $1 + 1 = 4$.

Malheureusement, faute de temps, de très nombreux polluants n'ont pas pu être décrits, mais sont pourtant très nocifs. C'est le cas notamment des métaux, du formaldéhyde ou des radionucléides très présents également dans les fumées d'incendie.

D'après les réponses apportées par les pompiers interrogés, la formation semble être le levier le plus abordable et le plus significatif. Ces hommes et ces femmes éprouvent le besoin de recevoir régulièrement des informations sur la toxicité des polluants pour pouvoir ainsi mieux se protéger. La formation est donc l'axe d'effort principal à étudier par les centres de secours.

Une autre piste est également à explorer. Il s'agit de partager les bonnes pratiques entre départements. Effectivement, on observe une différence de protocole entre départements, pourtant les problématiques auxquelles sont confrontés ces collègues sont les mêmes. On observe qu'au 2^{ème} GIS de la BSPP il n'existe pas encore de protocole de déshabillage et de dépollution ; pourquoi ne pas simplement transposer ce qui est déjà réalisé par le SDIS du Nord ? Bien sûr, pour réaliser ce type de protocole, il est nécessaire d'accroître le nombre d'EPI dans chaque centre de secours afin de procéder à leurs changements et à la pérennité du système protocolaire.

Aussi, ni dans les casernes SDIS du Nord ni dans les casernes du 2^{ème} GIS il n'existe un protocole de nettoyage systématique des engins au retour de feu. Aujourd'hui encore, l'ambiance est constamment polluée par les équipements et les personnels souillés par ces fumées. Une solution serait de créer un protocole de nettoyage, de définir une zone sale et une zone propre pour le nettoyage des équipements dans le but d'éviter la contamination croisée. De plus, il serait pertinent de rendre obligatoire et systématique le nettoyage des équipements, du personnel et du véhicule par le biais de protocoles internes.

En admettant qu'avec le changement climatique le nombre d'incendies risque d'augmenter en Europe, cela augmentera intrinsèquement le nombre d'interventions ainsi que la durée d'exposition aux fumées. C'est notamment le cas des nombreux incendies qui frappent le Brésil et l'Afrique actuellement. Cela nécessite donc une augmentation des systèmes de protection et de prévention. Les tenues seraient donc de plus en plus mises au lavage. Cependant, le nettoyage effectué par les entreprises extérieures ou au sein de la caserne permet-il d'éliminer tous les polluants présents sur la tenue ?

Pour apporter des perspectives à cette problématique, il serait nécessaire d'effectuer de nouvelles études françaises et internationales qui viendraient compléter les éléments acquis sur le sujet, et qui viendraient enrichir les recherches. Elles pourraient par exemple apporter une meilleure connaissance des polluants présents dans les fumées des différents types de feu. Cela permettrait de mieux évaluer le risque, et ainsi d'apporter des solutions plus précises pour que les personnels qui y sont confrontés puissent être informés et mieux protégés.

Certains polluants ne sont par ailleurs pas assez documentés. Des études complémentaires sur les effets cocktails pourraient être nécessaires. Elles viendraient compléter l'existant et pourraient ouvrir de nouvelles perspectives de recherches.

D'autre part, il pourrait être pertinent de lier les recherches scientifiques à l'aspect pratique de ce qui a été étudié dans ce mémoire. C'est-à-dire, d'évaluer quels sont les polluants présents sur les équipements des personnels. Nous en connaissons une partie, savons désormais quels sont leurs impacts sur la santé, mais n'avons pas encore eu la possibilité de les mesurer sur les équipements dans la réalité.

Enfin, il serait nécessaire d'évaluer les procédures de déséquipement de ces deux casernes, et de vérifier si le lavage pratiqué de manière récurrente se révèle véritablement optimal. Aujourd'hui, de nouveaux procédés de nettoyage automatisé apparaissent. Il serait intéressant d'en vérifier l'efficacité et à défaut, d'en trouver des alternatives.

Bibliographie

- ANSES. (2014). *Méthode d'évaluation des risques sanitaires liés à la présence de substances reprotoxiques et/ou perturbatrice endocriniennes dans les produits de consommation* [en ligne] Disponible sur : <<https://www.anses.fr/fr/system/files/CHIM2009sa0331Ra00.pdf?fbclid=IwAR1ysCXVUYcbsBikkDtAqjNNSj7L0-FnY3Ufd5dDR2MSXq1TQBfNahyT9CE>>
- ATSDR. (2014). *Medical Management Guidelines for Acrolein*. [en ligne] Disponible sur : <<https://www.atsdr.cdc.gov/MHMI/mmg124.pdf>>
- Bezier. (2019, Avril 17). *GDO - Prévention contre les risques de toxicité liés aux fumées d'incendie*. [en ligne] Disponible sur : <<https://www.histoiresdepompiers.fr/2019/04/17/gdo-prevention-contre-les-risques-de-toxicite-lies-aux-fumees-dincendie/>>
- Bezier. (2019, Avril 20). *MGO - Marche générale des opérations*. [en ligne] Disponible sur : : <https://www.histoiresdepompiers.fr/2019/04/20/mgo-marche-generale-operations/?_sm_au_=iVVvQvtLFv0skRv5>
- Brigade de sapeurs-pompiers de Paris. (2009). *BSP 118.10*. Paris.
- Canton, R., Sanderson, J., Nijmeijer, S., Bergman, A., Letcher, R., & Van Den Berg, M. (2006). In vitro effects of brominated flame retardants and metabolites on CYP17 catalytic activity: A novel mechanism of action? *Toxicology and applied pharmacology*, pp. 274-281.
- Chartry, C., Le Quentrec, M., Laurens, D., Le Gallou, J.-Y., Lafitte, J.-J., Creuchet, B., & Grelu, J. (2010). *Rapport de la mission interministérielle "Changement climatique et extension des zones sensibles aux feux de forêts"*. Ladocumentationfrancaise.fr: Conseil général de l'environnement et du développement durable. [en ligne] Disponible sur : <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/impacts-du-changement-climatique-sur-les-phenomenes-hydrometeorologiques/changement-climatique-et-feux-de-forets?_sm_au_=iVVwjnkj7DH5rRZj>
- Chasseraud. (1978). *Les bois de Boulogne et de Vincennes, réserves naturelles de Paris*. Paris: R.F.F. [en ligne] Disponible sur : <http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/21221/RFF_1978_3_165.pdf?sequence=1>
- Ciobella, A. (2008). Les composés organiques volatils (COV) : définition, classification et propriétés. doi:RMR-02-2008-25-2-01761-8425-101019-200802946
- CIRC. (1990). Vol. 48. *Monographie - Some Flame Retardants and Textile Chemicals, and Exposures in the Textile Manufacturing Industry*, pp. 45-109.
- CIRC. (1999). Vol. 71. *Monographie - Re-evaluation of Some Organic Chemicals, Hydrazine and Hydrogen Peroxide (Part 1, Part 2, Part 3)*, pp. 1365-1369.
- Citepa. (s.d.). [en ligne] Disponible sur : <<https://www.citepa.org/fr/air-et-climat/polluants/polluants-organiques-persistants/hydrocarbures-aromatiques-polycycliques>>
- CNESST. (2015). *Benzène*. [en ligne] Disponible sur : <https://www.csst.qc.ca/prevention/reptox/Pages/fiche-complete.aspx?no_produit=2543>
- Cottini, G., & Mazzone, G. (1939). The effects of 3,4-benzo(a)pyrene on human skin. *Cancer research*, pp. 186-195.

- Département Cancer Environnement. (2018, Septembre 3). *Classification des substances cancérigènes par le CIRC*. [en ligne] Disponible sur : <<https://www.cancer-environnement.fr/478-Classification-des-substances-cancerogenes.ce.aspx>>
- DGSCGC. (2017). Label de la "sécurité civile française". *Référentiel Technique Vêtements et Équipements de Protection pour Sapeurs Pompiers*, p. 30. [en ligne] Disponible sur : <<https://www.interieur.gouv.fr/content/download/104205/823625/file/referentiel-technique-vesp-tenue-service-et-intervention-vrtepsp1-2017.pdf>>
- DGSCGC. (2018). *Guide de doctrine relatif à la prévention contre les risques de toxicité liés aux fumées d'incendie*. [en ligne] Disponible sur : <<https://www.sdis70.fr/ged/gdo-prevention-risques-toxicite-fumees-220320182.pdf>>
- Dockery, D. (2009, 04). Health effects of particulate air pollution. *Annals of epidemiology*, 4, pp. 257-263.
- Donaldson, K., & Stone, V. (2003). Current hypotheses on the mechanisms of toxicity of ultrafine particles. *Annali dell'istituto superiore di sanita*, 3, pp. 405-410.
- Dufour, P., & Charlier, C. (2017). Les retardateurs de flamme bromés : impact sur l'environnement et la santé des individus. *Annales de biologie clinique*, 75(2), pp. 146-157.
- ECHA. (2019, 07 08). *Xylene*. [en ligne] Disponible sur : <<https://echa.europa.eu/fr/registration-dossier/-/registered-dossier/15448/2/1>>
- EFSA. (2010). Scientific Opinion on Polybrominated Biphenyls (PBBs) in Food. *EFSA Journal*, 8(10), pp. 3-151.
- Ema, M., Fujii, S., Hirata-Koizumi, M., & Matsumoto, M. (2008). Two-generation reproductivetoxicity study of the flame retardant hexabromocyclododecane in rats. *Reproductive toxicology*, pp. 335-351.
- Eriksson, P., Fischer, C., Wallin, M., Jakobsson, E., & Fredriksson, A. (2006). Impaired behaviour, learning and memory, in adult mice neonatally exposed to hepbromocyclododecane (HBCDD). *Environmental toxicology and pharmacology*, 21, pp. 317-322.
- Eskenazi, B., Chevrier, J., Rauch, S., Kogut, K., Harley, K., Johnson, C., . . . Bradman, A. (2013). In utero and childhood polybrominated diphenyl ether (PBDE) exposures and neurodevelopment in the CHAMACOS study. *Environmental health perspectives*, 121(2), pp. 257-262.
- Firerescue1. (2011, Décembre 21). *heat, fuel and oxidization*. [en ligne] Disponible sur : <<https://www.firerescue1.com>>
- Gabelova, A., Vallovcova, Z., Labaj, J., Bacova, G., Binkova, B., & Farmer, P. (2007). *Assessment of oxidative DNA damage formation by organic complex mixtures from airborne particles PM(10)*. *Mutat Res.*
- Hewitt, F., Christou, A., Dickens, K., Walker, R., & Stec, A. (2017). Release of volatile and semi-volatile toxicants during house fires. *Chemosphère*, pp. 580-593.
- IARC. (2010). Painting, Firefighting, and Shifwork. *IARC Monographs on the Evaluation of Carinogenic Risk to Humans*, 98, pp. 395-559.
- INERIS. (2005). *Toxicité et dispersion des fumées d'incendie Phénoménologie et modélisation des effets*. (page 16). [en ligne] Disponible sur : <https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/Omega_16_Toxicite_fumees_web.pdf>
- INERIS. (2006). *Benzo(a)pyrène*. [en ligne] Disponible sur <<https://substances.ineris.fr/fr/substance/getDocument/2720>>

- INERIS. (2008, 01 28). *Seuils de Toxicité aiguë - Acroléine*. [en ligne] Disponible sur :
<<http://substances.ineris.fr/fr/substance/getDocument/2657>>
- INERIS. (2009). *Compte-rendu débat INERIS – Qualité de l'air et combustion du bois*. [en ligne] Disponible sur : <<https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/crr-qualite-air-vs-combustion-du-bois-def.pdf>>
- INRS. (1999). Produits de dégradation des matières plastiques. *Cahiers de notes documentaires - Hygiène et sécurité du travail*, pp. **47-57**.
- INRS. (2007). *FT n°144 - Benzo(a)pyrène*. [en ligne] Disponible sur :
<http://www.inrs.fr/dms/ficheTox/FicheFicheTox/FICHETOX_144-2/FicheTox_144.pdf>
- INRS. (2007). *FT n°204 - Naphtalène*. [en ligne] Disponible sur :
<http://www.inrs.fr/dms/ficheTox/FicheFicheTox/FICHETOX_204-4/FicheTox_204.pdf>
- INRS. (2009). *FT n°77 - Xylènes*. [en ligne] Disponible sur :
<http://www.inrs.fr/dms/ficheTox/FicheFicheTox/FICHETOX_77-3/FicheTox_77.pdf>
- INRS. (2011). *FT n°49 - Benzène*. [en ligne] Disponible sur :
<http://www.inrs.fr/dms/ficheTox/FicheFicheTox/FICHETOX_49-4/FicheTox_49.pdf>
- INRS. (2012). *FT n°74 - Toluène*. [en ligne] Disponible sur :
<http://www.inrs.fr/dms/ficheTox/FicheFicheTox/FICHETOX_74-2/FicheTox_74.pdf>
- INRS. (2013). *Les équipements de protection individuelle (EPI)*. [en ligne] Disponible sur :
<<http://www.inrs.fr/dms/inrs/CataloguePapier/ED/TI-ED-6077/ed6077.pdf>>
- INRS. (2015). *FT n°57 - Acroleine*. [en ligne] Disponible sur :
<http://www.inrs.fr/dms/ficheTox/FicheFicheTox/FICHETOX_57-4/FicheTox_57.pdf>
- INRS. (2018, 04). *FT n°266 - Ethylbenzène*. [en ligne] Disponible sur :
<http://www.inrs.fr/dms/ficheTox/FicheFicheTox/FICHETOX_266-2/FicheTox_266.pdf>
- Institut de Recherche et d'Expertise Scientifique. (s.d.). [en ligne] Disponible sur :
<<http://www.ires-lab.com/Compose-Organique-Semi-Volatile.htm>>
- International Association of Wildland Fire. (2019). *Events*. [en ligne] Disponible sur :
<<https://www.iawfonline.org/events/>>
- International Technical Committee for the Prevention and Extinction of fire . (2018). *World fire Statistics. CTIF*, pp **49-51**.
- ISO. (1993). *ISO 9705:1993(E) - THE ROOM/CORNER TEST*. [en ligne] Disponible sur :
<<http://fr.polymerinsights.com/testing/flammability/iso-9705>>
- ISO. (2016). *ISO 9705:1993 ; Essais au feu -- Essai dans une pièce en vraie grandeur pour les produits de surface*. [en ligne] Disponible sur : <<https://www.iso.org/fr/standard/17561.html>>
- Jaililian, H., Ziaei, M., Weiderpass, E., Rueegg, C., Khosravi, Y., & Kjarheim, K. (2019). Cancer incidence and mortality among firefighters. *International journal of cancer*, pp. **48-69**.
- Legifrance. (2008, 01 31). *Arrêté du 31 janvier 2008 relatif au registre et à la déclaration annuelle des émissions et de transferts de polluants et des déchets*. [en ligne] Disponible sur :
<<https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000018276495>>
- Legifrance. (2010, 10 21). *Code de l'environnement - Article R221-1*. [en ligne] Disponible sur :
<<https://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do?idArticle=LEGIARTI000022964539&cidTexte=LEGITEXT000006074220&dateTexte=20101024>>

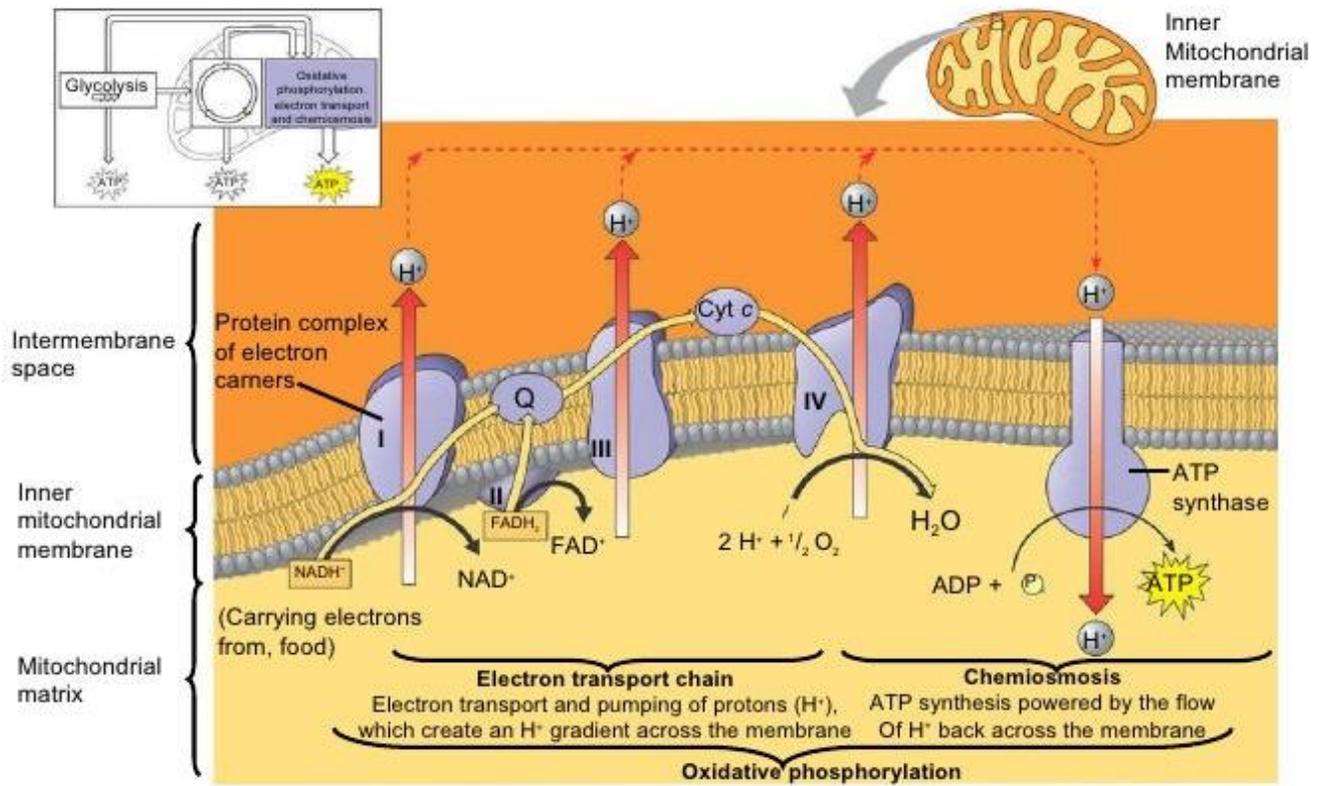
- LeMasters, G., Genaidy, A., Succop, P., Deddans, J., Sobeih, T., Barriera-Viruet, H., . . . Lockey, J. (2006). Cancer risk among firefighters: a review and meta-analysis of 32 studies. *Journal of occupational and environment medicine*, pp. **1189-1202**.
- Lemieux, P. M., Lutes, C., & Santoianni, D. (2004). *Emissions of organic air toxics from open burning: a comprehensive review*.
- Lepers, C., J. Martin, P., Armand, L., Verdin, A., Cazier, F., Courcot, D., . . . Shirali, P. (2014, Février 11). *Recherche de mécanismes de toxicité des particules fines : conséquences de PM2.5 sur des marqueurs épigénétique*, pp. **39-45**
- Lönnermark, A., Blomqvist, P., Mansson, M., & Persson, H. (1996). *TOXFIRE - Fire Characteristics and smoke gas analyses in under-ventilated large-scale combustion experiments - SP 1996:46*. **36p**
- Luan, M., Liang, H., Yang, F., Yuan, W., Chen, A., Liu, X., . . . Miao, M. (2019). Prenatal polybrominated diphenyl ethers exposure and anogenital distance in boys from a Shanghai birth cohort. *International journal of hygiene and environmental health*, 222(3), pp. **513-523**.
- Marteau, C. (2012). Retardateurs de flamme bromés : métabolites actifs et biomarqueurs d'exposition chez l'homme. *Thèse de doctorat en pathologie, toxicologie, génétique et nutrition*, p. **268** p.
- Mennen, M., & van Belle, N. (2007). *Emissies van schadelijke stoffen bij branden*. [en ligne] Disponible sur : <<https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/609021051.pdf>>
- NIOSH. (2018). *Appendix G* . [en ligne] Disponible sur :<<https://www.cdc.gov/niosh/npg/nengapdxg.html>>
- OSHA & NIOSH . (2018). *Benzene*. [en ligne] Disponible sur : <<https://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0049.html>>
- Papoušek, R., Pataj, Z., Nováková, P., Lemr, K., & Barták, P. (2014). Determination of Acrylamide and Acrolein in Smoke from Tobacco and E-Cigarettes. *Chromatographia*, 77, pp. **1145-1151**.
- Parlement et Conseil européen. (2000). *Directive n° 1999/13/CE du 11/03/99 relative à la réduction des émissions de composés organiques volatils dues à l'utilisation de solvants organiques dans certaines activités et installations*. [en ligne] Disponible sur : <https://aida.ineris.fr/consultation_document/1015>
- Perera, R., Fleming, A., Johnson, R., Burrows, C., & White, H. (2017). Detection of Benzo[a]pyrene-Guanine Adducts in Single-Stranded DNA using the α -Hemolysin Nanopore. *Nanotechnology*. pp. **569-576**
- Pope, C. (2015). *schaemic heart disease and fine particulate air pollution*. *Heart*, 101:pp **248-249**.
- Research Institutes of Sweden. (1996). *Published SP reports about the project (from report 44 to 49)*. [en ligne] Disponible sur : <<https://www.sp.se/en/index/research/eu-project/projectcompleted/toxfire/sidor/default.aspx>>
- Rice, D., Reeve, E., Herlihy, A., Thomas Zoeller, R., Douglas Thompson, W., & Markowski, V. (2007). Developmental delays and locomotor activity in the C57BL6/J mouse following neonatal exposure to the fully-brominated PBDE, decabromodiphenyl ether. *Neurotoxicology and teratology*, 29, pp. **511-520**.
- RTI international. (2015). *Fluorescent Aerosol Screening Test (FAST) Test Report*. p. **17 p**. [en ligne] Disponible sur : <https://www.responderwipes.com/wp-content/uploads/2016/07/RTI_Test_Report-FAST-Jan2015.pdf>

- Santé publique France. (2016). *Impacts de l'exposition chronique aux particules fines sur la mortalité en France continentale et analyse des gains en santé de plusieurs scénarios de réduction de la pollution atmosphérique*. R[en ligne] Disponible sur : <<https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-27052-etude-invs-impact-sanitaires-pollution-air.pdf>>
- SDIS 59. (2018, Octobre). Trousses suies-incendie. *Actualités*, p. **1 pp**. [en ligne] Disponible sur : <<https://sdis59.fr/actualite>>
- Service-Public. (2016, Mars 18). *Des arbres, des bois et des forêts : le patrimoine vert du ministère*. [en ligne] Disponible sur : <<https://agriculture.gouv.fr/des-arbres-des-bois-et-des-forets-le-patrimoine-vert-du-ministere>>
- Service-Public. (2019, Septembre). *La banque de données sur les incendies de forêts en région Méditerranéenne en France*. [en ligne] Disponible sur : <http://www.promethee.com/default/bilan-tableaux?_sm_au_=iVVvQtvLFv0skRv5>
- Stefanidou , M., Athanaselis, S., & Spiliopoulou, C. (2008, 06 20). Health impacts of fire smoke inhalation. *Inhalation toxicology*, *8*, pp. **761-767**.
- Techniques de l'ingénieur. (2010). *Les COV... mais qu'est-ce que c'est ?* [en ligne] Disponible sur : <<https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/les-cov-mais-quest-ce-que-cest-3392/>>
- Tordjman, I. (2009). *Risques de cancers et particules fines*. INCA, InVS. [en ligne] Disponible sur : <https://www.cancerenvironnement.fr/Portals/0/Documents%20PDF/Rapport/INCa/2009_FR%20particulesfines.PDF>
- Unité cancer et environnement. (2018). *Benzène*. [en ligne] Disponible sur : <<https://www.cancer-environnement.fr/248-Benzene.ce.aspx>>
- Urbanski. (2014). Wildland fire emissions, carbon, and climate: Emission factors. *Forest Ecology and Management*, *317*, pp. **51-60**.
- Urbanski, S. (2014). Wildland fire emissions, carbon, and climate: Emission factors. *Forest Ecology and Management*, *317*, pp. **51-60**.
- Urbanski, S., Baker, S., & Hao, W. M. (2009). Chemical Composition of Wildland Fire Emissions. *Developments in Environmental Science*, *8*, pp. **79-107**.
- Van Den Heuvel, R., Staelens, J., Koppen, G., & Schoeters, G. (2018, 02 12). Toxicity of Urban PM10 and Relation with Tracers of Biomass Burning. *International journal of environmental research and public health*, pp. **320-328**.
- Vershaere , A. (2018, Avril 6). *Les 3 modes de transfert thermique*. [en ligne] Disponible sur :: <<https://jeretiens.net/les-3-transferts-thermiques/>>
- Wang, C., Tu, Y., Yu, Z., & Lu, R. (2015). *PM2.5 and Cardiovascular Diseases in the Elderly: An Overview*. pp. **145-153**
- Wayne, E., & Cascio. (2018, 05 15). Wildland fire smoke and human health. *Science of the total environment*, *624*, pp. **586-595**.

ANNEXES

Annexe 1 : Schéma de la chaîne respiratoire chez l'homme (oxydo/réduction).....	65
Annexe 2 : INRS – produit dégradation des matières toxiques.....	66
Annexe 3 : Données complémentaires de l'étude d'Hewitt et coll.	68
Annexe 4 : Résultats des expériences du projet TOXFIRE.....	74
Annexe 5 : INERIS – guide méthodologique : Liste des 16 HAP prioritaires.....	75
Annexe 6 : INRS – Mécanismes de la métabolisation du benzène.....	77
Annexe 7 : RTI – Figures complémentaires de l'étude sur les EPI par l'IAFF.....	78
Annexe 8 : Ensemble du questionnaire diffusé en ligne.....	80

Annexe n°1 : Schéma de la chaîne respiratoire chez l'homme (oxydo/réduction)



Annexe n°2 : INRS – produit dégradation des matières toxiques

TABEAU V

(SUITE)

Matières plastiques	Aux températures de mise en œuvre	En cas de pyrolyse ou de combustion
Polyamides	(200-400°C) Jusqu'à 290-300°C: -Hydrocarbures aliphatiques -Aldéhydes (acétaldéhyde, acroléine, crotonaldéhyde,...) -Nitriles (acrylonitrile, acétonitrile...) -Cétones (acétone...) en plus, vers 400°C: -Ammoniac	-Monoxyde de carbone -Dioxyde de carbone -Ammoniac -Cyanure d'hydrogène -Nitriles (acétonitrile, acrylonitrile...) -Aldéhydes
Polycarbonates	(220-330°C) À partir de 250°C: -Hydrocarbures aliphatiques insaturés et aromatiques (benzène, toluène...) -Aldéhydes	-Monoxyde de carbone -Dioxyde de carbone -Hydrocarbures (méthane...) -Bisphénol A
Cellulosiques	Acétate de cellulose (130-250°C) À partir de 175°C: -Aldéhydes (formaldéhyde, acroléine, butyraldéhyde) et éventuellement: -Anhydride phtalique avec certains plastifiants comme les phtalates	-Monoxyde de carbone -Dioxyde de carbone -Acide acétique -Acétaldéhyde -Acétone
	Nitrates de cellulose À partir de 40°C: -Oxydes d'azote -Hydrocarbures -Nitriles -Ammoniac -Cyanure d'hydrogène	-Monoxyde de carbone -Dioxyde de carbone -Oxydes d'azote -Hydrocarbures -Nitriles -Ammoniac -Cyanure d'hydrogène
Polyesters linéaires	Polyéthylène téréphtalate Polybutylène téréphtalate (90-300°C) À partir de 270°C: -Aldéhydes (acétaldéhyde, acroléine...) -Hydrocarbures aliphatiques (éthylène...)	-Monoxyde de carbone -Dioxyde de carbone -Hydrocarbures -Aldéhydes -Bromure d'hydrogène, si présence de produits significativement bromés
Polyfluoroéthènes	Polytétrafluoroéthylène (Jusqu'à 440°C) À partir de 350°C: -Hydrocarbures fluorés, saturés et insaturés (tétrafluoroéthylène, hexafluoroéthane, hexafluoropropylène, octafluoroisobutylène...) -Hydrocarbures fluorés cycliques (octafluorocyclobutane...)	-Monoxyde de carbone -Dioxyde de carbone -Fluorure d'hydrogène -Fluorure de carbonyle -Hydrocarbures fluorés, saturés et insaturés (tétrafluoroéthylène, hexafluoroéthane, hexafluoropropylène, octafluoroisobutylène...) -Hydrocarbures fluorés cycliques (octafluorocyclobutane...)
	Polychlorotrifluoroéthylène (Jusqu'à 350°C) À partir de 280°C: -Composés chlorés et fluorés (chlorotrifluoroéthylène...)	-Monoxyde de carbone -Dioxyde de carbone -Fluorure de carbonyle -Composés chlorés et fluorés -Fluorure d'hydrogène -Chlorure d'hydrogène
	Polyfluorure de vinylidène (Jusqu'à 350°C) À partir de 300°C: -Fluorure d'hydrogène -Composés fluorés	-Monoxyde de carbone -Dioxyde de carbone -Fluorure d'hydrogène -Composés fluorés
Polyacétals	Polyoxyméthylène (170-230°C) À partir de 190°C: -Formaldéhyde -Méthylal -1,3-Dioxolane -Trioxane	-Monoxyde de carbone -Dioxyde de carbone -Hydrocarbures -Aldéhydes (formaldéhyde, méthylal...)
Polysulfones	Polysulfones	-Monoxyde de carbone -Dioxyde de carbone -Méthane -Dioxyde de soufre
Polysulfure de phénylène	Polysulfure de phénylène	-Monoxyde de carbone -Dioxyde de carbone -Dioxyde de soufre -Sulfure d'hydrogène

TABLEAU VI
PRODUITS DE DÉGRADATION THERMIQUE DES COMPOSÉS OU PLASTIQUES THERMODURC ISSABLES
 Resulting products of thermal degradation of thermorigid plastics

	Matières plastiques	Aux températures de mise en œuvre	En cas de pyrolyse ou de combustion
Polyesters insaturés	Polyesters insaturés	-Styrène -Méthacrylate de méthyle et éventuellement : -Amines tertiaires (accélérateurs)	-Monoxyde de carbone -Dioxyde de carbone -Hydrocarbures -Ammoniac -Chlorure et bromure d'hydrogène, si présence de produits ignifugés halogénés
		(Jusqu'à 300°C)	-Monoxyde de carbone
Phéno-plastes	Résines de phénol-formaldéhyde	-Phénol -Formaldéhyde et éventuellement : -Ammoniac, si présence d'hexaméthylène tétramine	-Dioxyde de carbone -Hydrocarbures aliphatiques (méthane) et aromatiques -Phénol
		(Jusqu'à 200°C)	-Monoxyde de carbone -Dioxyde de carbone -Ammoniac -Cyanure d'hydrogène -Nitriles -Oxydes d'azote -Hydrocarbures aliphatiques légers (méthane...)
Aminoplastes	Résines durées-formaldéhyde	-Formaldéhyde -Ammoniac	-Monoxyde de carbone -Dioxyde de carbone -Ammoniac -Cyanure d'hydrogène -Nitriles -Oxydes d'azote -Hydrocarbures aliphatiques légers (méthane...)
	Résines de mélamine-formaldéhyde	-Formaldéhyde	-Monoxyde de carbone -Dioxyde de carbone -Cyanure d'hydrogène -Ammoniac -Hydrocarbures aliphatiques -Oxydes d'azote
Résines alkyles modifiées aux huiles	Résines oléoglycérophthaliques		-Monoxyde de carbone -Dioxyde de carbone -Hydrocarbures aromatiques -Aldéhydes (acroléine...)
Polyépoxydes	Polyépoxydes	Lors du durcissement à chaud (température pouvant atteindre 240 °C) : -Éthers glycidiques -Amines (triéthylène tétramine...)	-Monoxyde de carbone -Dioxyde de carbone -Hydrocarbures aliphatiques (méthane, éthylène...) -Hydrocarbures aromatiques légers (toluène...) -Aldéhydes (formaldéhyde...) -Acide formique
Polyimides	Polyimides		-Monoxyde de carbone -Dioxyde de carbone -Cyanure d'hydrogène -Ammoniac -Hydrocarbures aromatiques -Oxydes d'azote
Polyuréthannes	Polyuréthannes	(Jusqu'à 250°C) -Isocyanates (monomères, prépolymères) -Amines -Cétones -Aldéhydes -Hydrocarbures légers	-Monoxyde de carbone -Dioxyde de carbone -Oxydes d'azote -Ammoniac -Nitriles (acétonitrile, benzonitrile, acrylonitrile) -Cyanure d'hydrogène -Hydrocarbures aliphatiques et aromatiques -Diisocyanates, leurs dimères et polymères -Chlorure d'hydrogène, bromure d'hydrogène ou produits phosphorés, si présence de produits ignifugés halogénés ou phosphorés
Polyorganosiloxanes	Polyorganosiloxanes		-Monoxyde de carbone -Dioxyde de carbone -Hydrocarbures aliphatiques et aromatiques -Poussières de silice

Annexe n°3: Données complémentaires de l'étude d'Hewitt et coll.

Compound (CAS #)	Toxicity information
Benzo[a]pyrene (50-32-8)	IARC Group 1 Skin Sensitization - Category 1 Germ Cell Mutagenicity - Category 1A Carcinogenicity - Category 1A Reproductive Toxicity - Category 1A
Dibenz[a,h]anthracene (53-70-3)	IARC Group 2A Carcinogenicity Category 1B
Naphthalene (91-20-3)	IARC Group 2B Acute oral toxicity – Category 4 Acute dermal toxicity – Category 4 Acute inhalation toxicity – Category 4
2-chlorophenol (95-57-8)	IARC Group 2B Skin irritation – Category 2 Serious eye damage/irritation – Category 2 Acute oral toxicity – Category 3
Indeno[1,2,3-cd]pyrene (193-39-5)	IARC Group 2B Carcinogenicity – Category 2
Benzo[b]fluoranthene (205-99-2)	IARC Group 2B
Benzo[c]phenanthrene (195-19-7)	IARC Group 2B Eye irritation - Category 2A Acute oral toxicity - Category 4, Acute inhalation toxicity -Category 4 Acute dermal toxicity - Category 4
Benz[a]anthracene (56-55-3)	IARC Group 2B Carcinogenicity - Category 1B

Chrysene (218-01-9)	IARC Group 2B Carcinogenicity - Category 1B
Benzo[k]fluoranthene (207-08-9)	IARC Group 2B Carcinogenicity - Category 1B
2-Propanol, 1-chloro-, phosphate (3:1) (Derived from TCPP) (13674-84-5)	Acute oral toxicity - Category 4
4-methylphenyl diphenyl ester Phosphoric acid (CDP) (78-31-9)	Acute oral toxicity -Category 4
Triethyl phosphate (TEP) (78-40-0)	Acute oral toxicity - Category 4
Triphenyl phosphate (TPP) (115-86-6)	Acute aquatic toxicity - Category 1
Tris(3-methylphenyl) ester Phosphoric acid (563-04-2)	Acute oral toxicity – Category 4 Acute dermal toxicity – Category 4
Tris(4-methylphenyl) ester Phosphoric acid (m-TCP) (78-32-0)	Acute oral toxicity – Category 4 Acute dermal toxicity – Category 4
2-butoxy-phosphate (3:1) Ethanol (TBEP) (78-51-3)	Acute inhalation toxicity - Category 4 Acute dermal toxicity -Category 4 Skin and eye irritation - Category 2 Specific target organ toxicity - single exposure - Category 3

(1-methylethyl)phenyl diphenyl ester Phosphoric acid (28108-99-8)	No data available
Bis(4-methylphenyl) phenyl ester phosphoric acid (34909-69-8)	No data available
Bis(3-chloro-1-propyl)(1- chloro-2-propyl)phosphate (137888-35-8)	No data available
(p-hydroxyphenyl)- Phosphonic acid (33795-18-5)	No data available
Anthracene (120-12-7)	IARC Group 3 Skin Corrosion/irritation - Category 2 Serious Eye Damage/irritation - Category 2
Fluorene (86-73-7)	IARC Group 3
Phenanthrene (85-01-8)	IARC Group 3 Acute oral toxicity - Category 4
Fluoranthene (206-44-0)	IARC Group 3 Acute oral toxicity - Category 4
Pyrene (129-00-0)	IARC Group 3 Specific target organ toxicity - repeated exposure - Category 1 (Blood)
Benzo[ghi]perylene (191-24- 2)	IARC Group 3

Benzo[ghi]fluoranthene (203-12-3)	IARC Group 3
Triphenylene (217-59-4)	IARC Group 3 Serious eye damage - Category 1
3,4-dihydro- Cyclopenta[cd]pyrene (25732-74-5)	IARC Group 3
Perylene (198-55-0)	IARC Group 3
Quinoline (91-22-5)	EPA Group C – possible human carcinogen Carcinogenicity - Category 1B Acute oral toxicity - Category 3 Acute dermal toxicity - Category 4 Skin and eye irritation - Category 2
Acenaphthylene (208-96-8)	Acute oral toxicity - Category 4 Skin and eye irritation - Category 2 Specific target organ toxicity (Respiratory system) single exposure - Category 3
Biphenyl (92-52-4)	Skin and eye irritation - Category 2 Specific target organ toxicity - single exposure - Category 3
Phenanthridine (229-87-8)	Acute oral toxicity - Category 3 Skin irritation - Category 2 Serious eye damage - Category 1 Specific target organ toxicity - single exposure - Category 3 Mutagenic
1,2,4-trimethyl-Benzene (95-63-6)	Acute inhalation toxicity - Category 4 Skin and eye irritation - Category 2 Specific target organ toxicity (Respiratory system) - single exposure Category 3

Benzoic acid (65-85-0)	Skin irritation - Category 2 Serious eye damage - Category 1 Specific target organ toxicity (Lungs) - repeated exposure, Inhalation - Category 1
4-Cyano benzoic acid (619-65-8)	Acute inhalation toxicity-Category 4 Acute oral and dermal toxicity - Category 4 Skin and eye irritation Category 2 Specific target organ toxicity - single exposure - Category 3
1,3-Dicyanobenzene (626-17-5)	Acute inhalation toxicity -Category 4 Acute oral toxicity - Category 4
1,2-Benzenedicarbonitrile (91-15-6)	Acute oral toxicity - Category 2
4-ethyl-2-methoxy-Phenol (2785-89-9)	Skin and eye irritation - Category 2 Specific target organ toxicity - single exposure - Category 3
3-hydroxy-4-methoxy-Benzaldehyde (621-59-0)	Skin and eye irritation - Category 2 Specific target organ toxicity - single exposure - Category 3
p-Terphenyl (92-94-4)	Skin and eye irritation - Category 2 Specific target organ toxicity - single exposure - Category 3
2-phenyl-Naphthalene (612-94-2)	No data available
1-isocyano-Naphthalene (84-04-9)	No data available
Pentachloro-Benzene	No data available

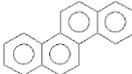
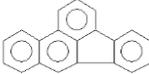
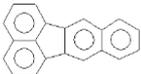
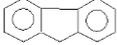
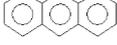
(608-93-5)	
6,7-Dihydro-2-methylamino-4H-oxazolo[3,2-a]-1,3,5-triazin-4-one (81287-23-2)	No data available
Benzo[h]cinnoline (230-31-9)	No data available
9-methylene-9H-Fluorene (4425-82-5)	No data available
Naphthacene (92-24-0)	No data available
1-(phenylmethylene)-1H-Indene (91360-95-1)	No data available
Naphthalic anhydride (81-84-5)	No data available
7,12-dihydro-Benz[a]anthracene	No data available
6H-Benz[de]anthracen-6-one (80252-14-8)	No data available
4,5-dihydro-Benzo[a]pyrene (57652-66-1)	No data available
1H-Phenalen-1-one (548-39-0)	No data available
Isophthalic acid (121-91-5)	No data available

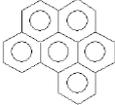
Annexe n°4 : Résultats des expériences du projet TOXFIRE

Test	CO	NO	NO ₂	HCN	NH ₃	SO ₂	HCl
PP8	7600	240	5	420	< 5	-	-
PP9	28000	72	6	510	310	-	-
Ny6	5800	300	2	1300	100	-	-
TMTM6	21000	270	13	7700	220	43000	-
CNBA5	39000	6900	220	2700	< 5	-	16000
CB7	3900	5	1	< 5	< 5	-	7000

Experiment	ϕ	Compound	Concentration in the smoke /(g/m ³)	Yield* /(g/kg)
PP9	0.74	Benzene	0.77	7.1
		Propene	0.12	1.09
		Naphthalene	0.098	0.91
		Toluene	0.057	0.53
		Propyne	0.020	0.19
		Styrene	0.020	0.18
		Ny6	0.48	Propane
Benzene	0.021			0.23
Toluene	0.010			0.11
Cyclopentanone	0.005			0.05
Benzonitrile	0.004			0.04
2-Propene nitrile	0.004			0.04
TMTM6	0.83			Propene
		Acetonitrile	0.020	0.10
		Benzonitrile	0.008	0.04
		Benzene	0.007	0.04
		2 Propene nitrile	0.005	0.03
		Thiophene	0.005	0.03
		CNBA5	0.63	Chlorobenzene
Dichlorobenzenes	0.75			3.6
Propene	0.42			2.0
Chlorobenzonitriles	0.100			0.48
Benzene	0.050			0.23
Benzonitrile	0.049			0.22
CB7	0.17			Chlorobenzene
		Benzene	0.14	2.9
		Naphthalene	0.039	0.84
		Chloroethynylbenzene	0.021	0.45
		Ethynylbenzene	0.017	0.37

Annexe n°5 : INERIS – guide méthodologique : Liste des 16 HAP prioritaires

Name	Structure	Weight	Toxicity data
Benzo(a)pyrene		252	IARC Group 1
Dibenzo(ah)anthracene		278	IARC Group 2A
Naphthalene		128	IARC Group 2B
Benz(a)anthracene		228	IARC Group 2B
Chrysene		228	IARC Group 2B
Benzo(b)fluoranthene		252	IARC Group 2B
Benzo(k)fluoranthene		252	IARC Group 2B
Indeno(1.2.3-dc)pyrene		276	IARC Group 2B
Acenaphthene		154	IARC Group 3
Fluorene		166	IARC Group 3
Phenanthrene		178	IARC Group 3
Anthracene		178	IARC Group 3
Fluoranthene		202	IARC Group 3

Pyrene		202	IARC Group 3
Benzo(ghi)perylene		276	IARC Group 3
Acenaphthylene		152	No IARC classification

Annexe n°6 : INRS – Mécanismes de la métabolisation du benzène

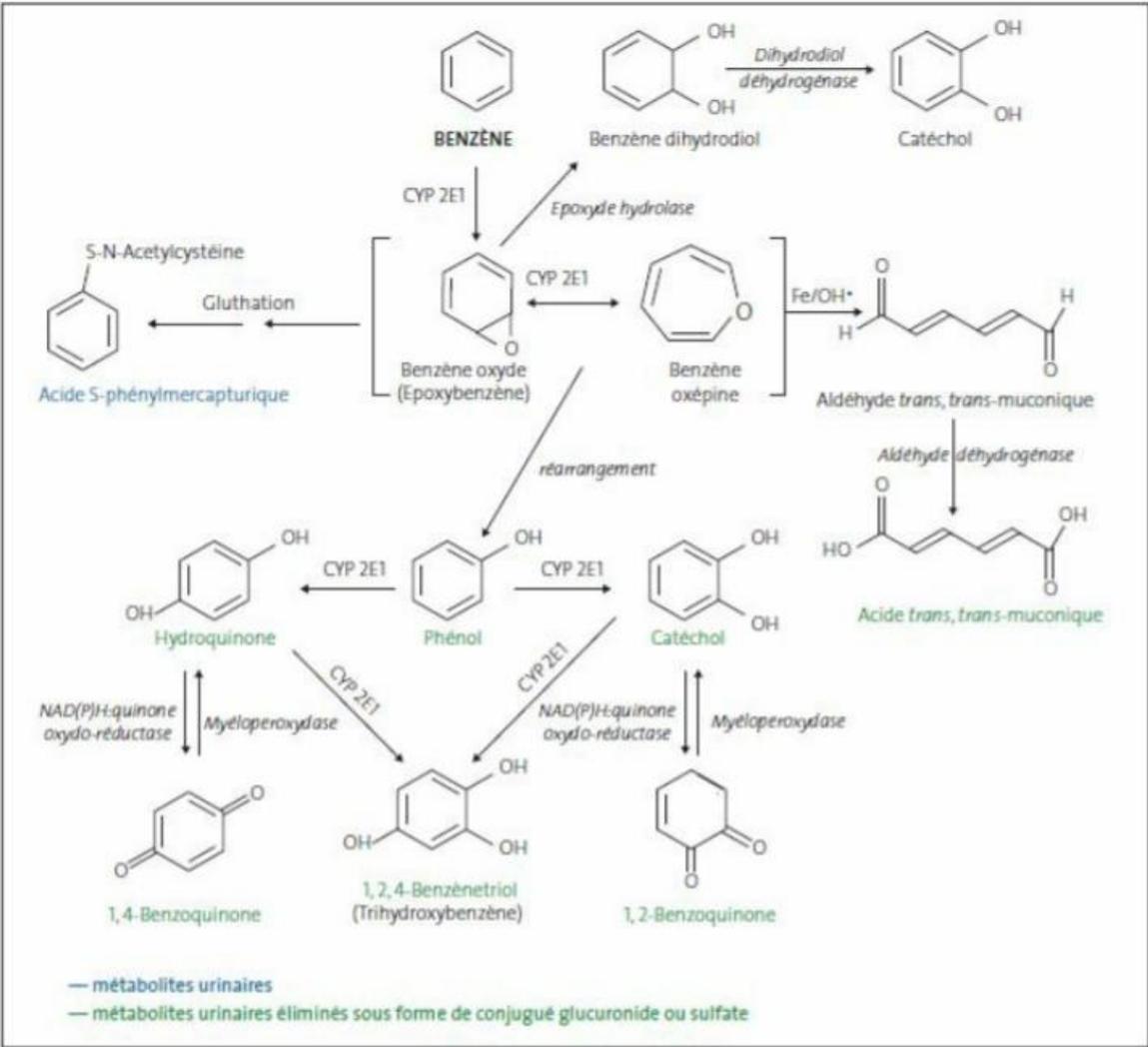
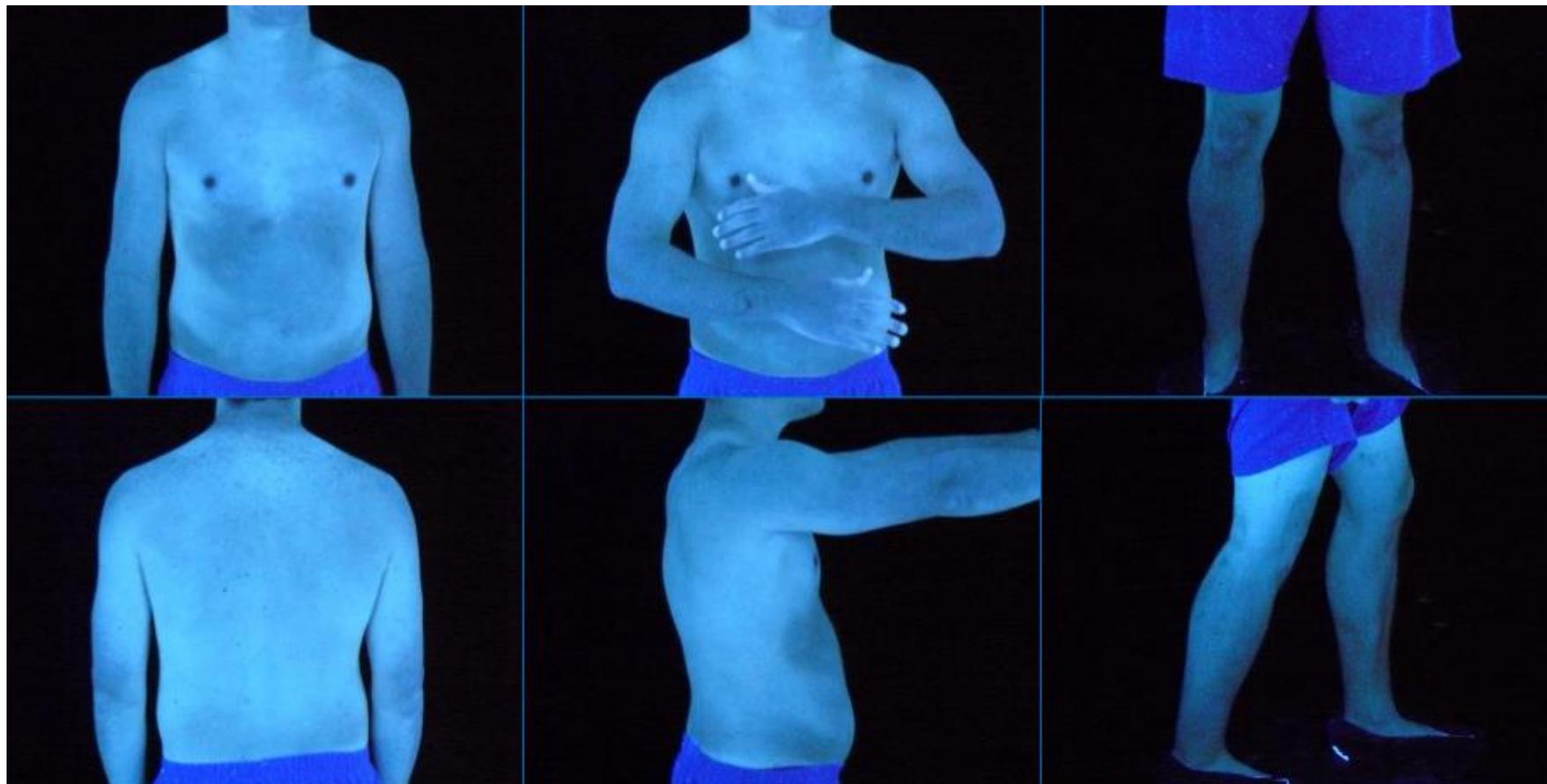


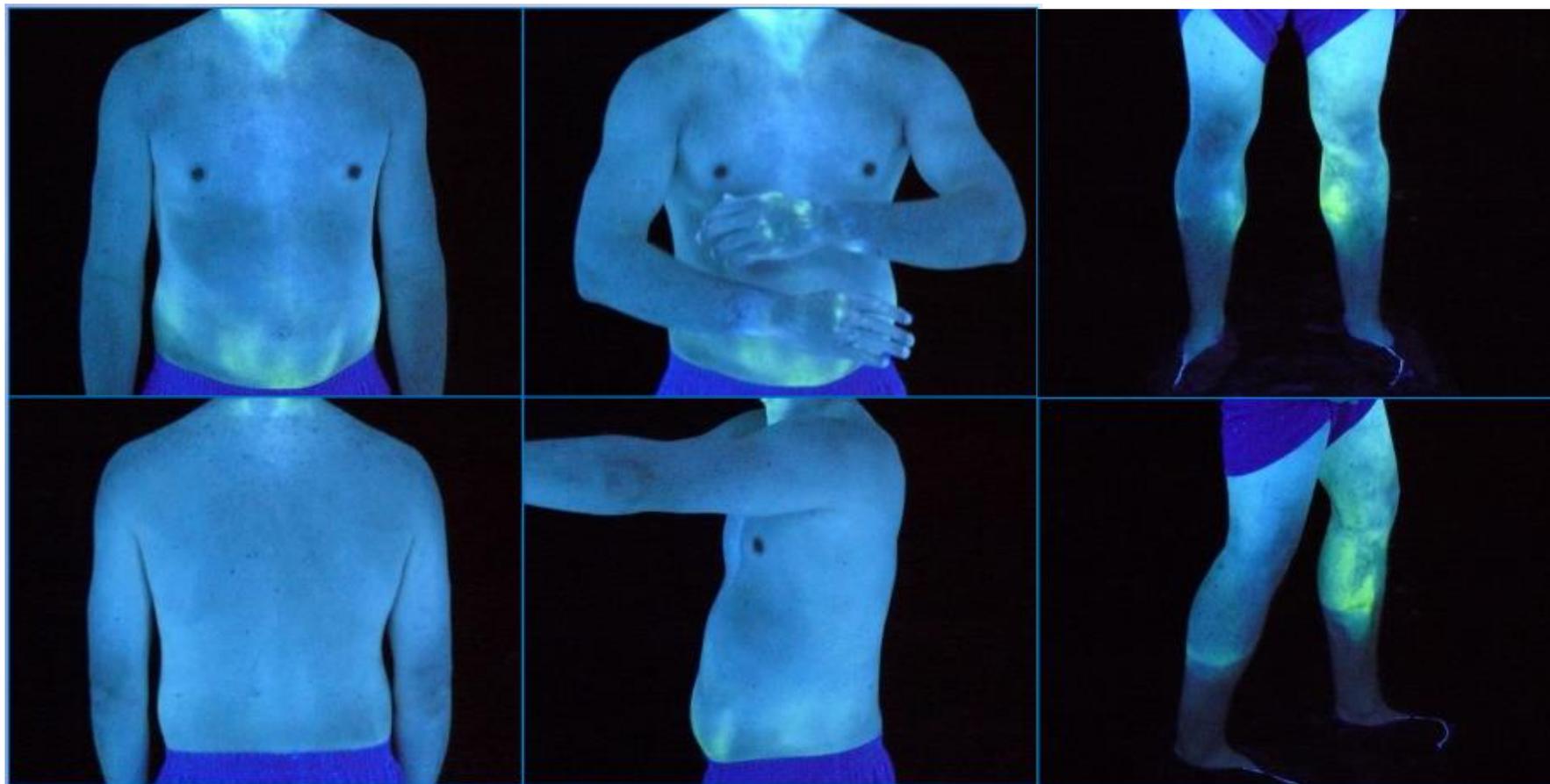
Fig. 1. Métabolisme du benzène [9]

Annexe n°7 : RTI – Figures complémentaires de l'étude sur les EPI par l'IAFF

Photos prises sous UV avant test



Photos prises sous UV après test



Annexe n°8 : Ensemble du questionnaire diffusé en ligne

Le questionnaire est remis en ligne pour visualisation jusqu'au 3 octobre 2019 minuit.

QR-CODE :



Lien :

<https://app.evalandgo.com/s/?id=JTk3aSU5NHEIOUIIQUQ=&a=JTk1byU5OGklOTglQUI=>

Amélioration de l'évaluation des risques liés à l'exposition professionnelle aux fumées d'incendies.

Depuis 2010, les fumées d'incendies sont de plus en plus étudiées par les scientifiques. En effet, chaque jour des hommes et des femmes sapeurs-pompiers professionnels et volontaires luttent, avec un courage sans faille, contre les flammes afin de sauver des vies. Cependant, de récentes études épidémiologiques internationales indiquent que ces engagés ont un risque relatif supérieur de développer un certain nombre de maladies, dont de nombreux cancers, par rapport à la population. C'est donc un réel paradoxe : les héros d'aujourd'hui deviennent les victimes de demain, notamment à cause de l'exposition répétée aux fumées d'incendies. Ces fumées contiennent de nombreux polluants plus ou moins nocifs pour l'homme et l'environnement. Pour cela, une connaissance approfondie des compositions des fumées d'incendies doit être effectuée. Ainsi, l'étude des effets chroniques des substances le plus souvent retrouvées sera rendue possible. Enfin, afin d'améliorer l'exposition, les pratiques de deux centres de secours nationaux vont donc être étudiées, critiquées et améliorées. Car il est peu compréhensible que ces volontaires et professionnels exerçant le même métier ait des pratiques différentes de protection contre les fumées d'incendies.

Mots clés : fumées d'incendie, sapeurs-pompiers, polluants, substances, hydrocarbures aromatiques polycycliques, HAP, naphthalène, benzo(a)pyrène, effets chroniques, effets aigus, acroléine, perturbateurs endocrinien, retardateurs de flammes, BTEX, particules en suspension, PM_{0.1}, PM_{2.5}, PM₁₀, cancers, équipement protection individuel, appareil respiratoire isolant, procédure, SDIS, BSPP, DGSCGC.

Since 2010, scientists have studied fire smoke more and more. In fact, every day, professional and volunteer men and women struggle with unwavering courage against fire in order to save lives. However, recent international epidemiological studies have shown that firefighters have a higher risk ratio of developing a number of diseases - including many cancers - than the population. We are facing a real paradox; heroes of today become the victims of tomorrow, especially due to exposure to smoke fire. Fire smoke release many pollutants. In general, they are harmful to human and the environment. For this purpose, a thorough knowledge of the composition of the smoke fire must be made. Thus, the study of the chronic effects of the substances most often found could be carried out. Finally, in order to improve exposure, the practices of two national fire stations will therefore be studied, criticized and improved. Indeed, it is not understandable that these people who are working as firefighters have different practices of protection against smoke fire.

Key words : fire smoke, firefighters, pollutants, substances, aromatic hydrocarbons polycyclic, PAHs, naphthalene, benzo(a)pyrene, chronic effects, acute effects, acrolein, endocrine disruptor, flame retardants, BTEX, particulate matters, PM_{0.1}, PM_{2.5}, PM₁₀, cancers, personal protective equipment, procedure, self contained breathing apparatus, SDIS, BSPP, DGSCGC.