



Impact sanitaire d'une attaque d'atténuation chez les sapeurs-pompiers de Paris

Julien Valdenaire

► To cite this version:

Julien Valdenaire. Impact sanitaire d'une attaque d'atténuation chez les sapeurs-pompiers de Paris. Sciences de l'Homme et Société. 2018. dumas-02109284

HAL Id: dumas-02109284

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02109284>

Submitted on 24 Apr 2019

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

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

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS

Centre de Paris

Mémoire

Présenté en vue d'obtenir le

Diplôme Ingénieur en Sécurité Sanitaire CYC50

Par

Julien VALDENNAIRE

**« EVALUATION DE L'IMPACT SANITAIRE CHEZ LES SAPEURS-POMPIERS D'UNE
ATTAQUE D'ATTENUATION LORS D'UN FEU D'HABITATION »**

Soutenu le 26 octobre 2018

Président du Jury : William Dab – Professeur du Cnam

Assesseurs : Laura Temime – Professeur des Universités

Maité Sylla – Maître de conférence

Laetitia Jaffré – Ingénieur en sécurité sanitaire

Maître de Stage : Lieutenant-colonel TESTA Fabian – Chef adjoint du Bureau Etude Prospective

Tuteur académique : Laura Temime – Professeur des Universités

Lexique

ANSES

Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'Alimentation, Environnement, Travail

ARI

Appareil Respiratoire Isolant

BMPM

Bataillon de Marins-Pompiers de Marseille

BOPO

Bureau Organisation Préparation Opérationnelle

BORH

Bureau Organisation Ressources Humaines

BPO

Bureau Planification Opérationnelle

BSH

Bureau Soutien de l'Homme

BSPP

Brigade de Sapeurs-Pompiers de Paris

CDC

Centers for Disease Control and prevention

CGCT

Code générale des Collectivités Territoriales

CIRC

Centre International de Recherche sur le Cancer

CLP

Classification Labelling Packaging

CNAM

Conservatoire National des Arts et Métiers

CNRACL

Caisse Nationale de Retraites des Agents des Collectivités Locales

COS

Commandant des Opérations de Secours

COV

Composés Organiques Volatils

DGSCGC

Direction Générale de la Sécurité Civile et de la Gestion des Crises

DN

Départ Normal

DOS

Direction des Opérations de Secours

EPA

Environmental Protection Agency

EPI

Equipement de Protection Individuelle

EQRS

Evaluation Quantitative du Risque Sanitaire

ERC

Excès de Risque Collectif

ERU

Excès de Risque Unitaire

FDNY

Fire Department of New York

FOTH

Facteur Organisationnel Technique Humain

GAS

Groupement des Appuis et de Secours

GFIS

Groupement de Formation, d'Instruction et de Secours

GIS

Groupement d'Incendie et de Secours

GSS

Groupement de Soutiens et de Service

HAP

Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

INRS

Institut National de Recherche et de Sécurité

LCP

Laboratoire Central de la Préfecture de Police

LQ

Limite de Quantification

MCO

Main Courante Opérationnelle

MGO

Marche Générale des Opérations

NIOSH

National Institute for Occupational Safety and Health

NIST

National Institute of Standard and Technology

NRBC

Nucléaire, Radiologique, Biologique et Chimique

NRC

National Research Council

OMS

Organisation Mondiale de la Santé

PM

Particules fines (Particules Matters)

QD

Quotient de Danger

RCCI

Recherches, Circonstances et Causes d'Incendie

RCP

Remise en Condition du Personnel

RIS

Rapport d'Incidence Standardisé

RO

Règlement Opérationnel

RMS

Rapport de Mortalité Standardisé

SIDACR

Schéma Interdépartemental d'Analyse et de Couverture des Risques

SRE

Summary Risk Estimate

UL

Underwriters Laboratories

VAR

Ventilateur Auxiliaire Relai

VRCP

Véhicule de Remise en Condition du Personnel

VTR

Valeurs Toxicologiques de Références

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé lors de la rédaction de ce mémoire.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance au professeur William DAB et madame Laura TEMIME pour la qualité de leurs enseignements et leurs disponibilités. Je les remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé tout au long de mon parcours d'ingénieur.

Je remercie également toute l'équipe pédagogique du conservatoire national des arts et métiers et leurs intervenants professionnels, pour avoir assuré la partie théorique de mon diplôme.

Je voudrais adresser toute ma gratitude au lieutenant-colonel TESTA qui m'a depuis le début soutenu et aiguillé pour poursuivre mon cursus avec succès. Son aide précieuse a guidé mon mémoire.

Je remercie en particulier monsieur Damien CHARLIER pour m'avoir ouvert l'esprit il y a 4 ans, pour avoir eu la patience de répondre à mes innombrables questions, pour son engagement et son soutien intellectuel qui ont permis la réalisation de ce mémoire.

Mes derniers remerciements sont pour ma femme Anne-Amélie et mon fils Louis. Leur soutien inconditionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide.

Résumé

Depuis une vingtaine d'années, les nombreux changements dans la conception des bâtiments et des matériaux modernes ont considérablement fait évoluer les feux d'habitation notamment en terme de toxicité des fumées. Dans le cadre de leur activité professionnelle, les sapeurs-pompiers de Paris sont exposés à de nombreux polluants mis en évidence par les études épidémiologiques récentes. L'objectif de cette étude est de mesurer l'impact sanitaire d'un nouveau mode d'action permettant entre autre de modifier des facteurs d'exposition, l'attaque d'atténuation.

Pour réaliser ce mémoire, nous avons établi la liste des différents polluants présents dans les fumées, et estimé les concentrations sur feux en France de 4 polluants majeurs à partir d'une revue des données disponibles. Puis nous avons affiné la matrice d'exposition d'un centre de secours type pour déterminer la durée d'exposition, sans ARI, des phases post-incendie et retour d'intervention. En nous appuyant sur des études réalisées aux Etats-Unis, nous avons pu estimer comment ces expositions seraient modifiées par la mise en place d'attaques d'atténuation. Enfin, nous avons utilisé l'approche d'évaluation quantitative des risques sanitaires (EQRS) pour quantifier les risques associés à l'exposition aux fumées des sapeurs-pompiers de Paris, avec et sans attaques d'atténuation.

L'EQRS réalisée prédit un excès de risque de cancer individuel moyen de 3.7/100 000, se traduisant par un total de 0,18 cas de cancer en excès attendus chez l'ensemble des 4 786 sapeurs-pompiers de Paris exposés aux fumées d'incendie. Il existe également pour les effets systémiques, un quotient de danger largement supérieur à 1 pour plusieurs polluants. L'attaque d'atténuation, qui conduit à une diminution des concentrations par rapport à une attaque classique, permet de réduire le nombre de cancers en excès attendus et les quotients de danger d'environ un tiers, sans pour autant permettre de faire passer les quotients de danger en dessous de 1.

En conclusion, il paraît nécessaire de mettre en place des préconisations pour diminuer les risques sanitaires liés à l'exposition aux fumées d'incendie. L'étude de nouveaux modes d'extinction, tels que l'attaque d'atténuation pourrait s'avérer une piste intéressante. Ces préconisations doivent être facilement applicables et les plus simples possibles.

Mots-clés : Excès de risque, quotient de danger, exposition, attaque d'atténuation, préconisation.

Abstract

For the past twenty years, the last evolutions in the design of buildings and modern materials have influenced the way home fires evolve, particularly in terms of smoke toxicity. As part of their daily jobs, the firefighters of Paris are often exposed to many pollutants revealed by recent epidemiological studies. The aim of the present study is to measure what type of health impact a new mode of action, the attack mitigation, would have by trying to alter the factors of exposition.

In order to write this paper, we have established a list of the various pollutants contained in smoke, and after reviewing the available data, we have measured the concentration of four major pollutants in fires in France. Then we have focused our attention on exposition in a typical fire station to determine the time of exposition without IBA (Individual Breathing Apparatus) during the postoperative period and on the way back to the station. Thanks to studies conducted in the United States, we have been able to realize how much the time of exposition can be changed by the implementation of fire attack mitigations. Finally, we have relied on the EQRS's approach to determine the impact of the Paris firefighters' exposition to smoke with and without a fire attack mitigation.

The assessment predicts in average an individual excess of risk of 3.7/100 000, which ultimately results in 0.18 more than expected cases of cancer in the total population of the 4 786 firefighters of Paris exposed to fire smoke. The risk quotient measuring the systemic effects is also above 1 with many pollutants. Contrary to a classical attack, the fire attack mitigation allows to reduce the concentration of pollutants and thus also reduces the expected cancer rate by cutting down by three the risk quotient. Nevertheless, the risk quotient remains above 1.

To conclude it is necessary to implement new methods of prevention in order to lower the sanitary risks connected to the exposition to smoke. The study of other modes of fire combat, such as the fire attack mitigation could lead to positive results. These measures must be practical and the simplest possible.

Keywords: Risk excess, risk quotient, exposition, mitigation attack, method of prevention.

Table des matières

I. Introduction	9
II. Contexte	10
A. Présentation de la BSPP	10
1. Histoire.....	10
2. Organisation.....	10
3. Conception tactique.....	11
4. Outils disponibles.....	12
B. Contexte de la problématique dans l'entreprise	14
C. Dispositions réglementaires.....	14
1. Par le code de la défense et les textes suivants :	14
2. Par des obligations réglementaires :	14
3. En matière de santé et de sécurité au travail :	15
D. Etat de l'art sur les risques sanitaires associés à l'exposition aux fumées d'incendie	16
1. Revue de la littérature.....	16
2. Les études à la BSPP.....	17
3. Les études sur l'attaque d'atténuation	18
III. Méthodes	20
A. La méthode EQRS.....	20
1. Introduction.....	20
2. Description de la méthode	20
3. Pertinence de la méthode selon les objectifs.....	21
B. Inventaire des polluants	21
1. Etude n°1 du laboratoire central de la préfecture de police [23].....	23
2. Etude n°2 du Journal of Occupational and Environmental Hygiène [3].....	23
3. Etude n° 3 du Center for Disease Control and Prevention (CDC) et du National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) [1].....	24
4. Etude n°4 de l'Illinois Fire Service Institute [24]	25
5. Etude n°5 de l'Underwriters Laboratories [26].....	26
C. Synthèse des polluants et de leurs effets sur la santé	28
D. Analyse de l'activité des sapeurs-pompiers de Paris	32
E. Estimation des concentrations en polluants présents dans les fumées lors des différentes phases de l'incendie	36
F. Protocoles d'essais sur la réalisation d'une attaque d'atténuation	36
1. Essais sur les limites d'emploi	36
2. Essais sur l'exposition des sapeurs-pompiers	36
3. Analyse des données issues de la littérature	37
IV. Résultats.....	37
A. Sélection des polluants retenus pour l'étude.....	37
B. Choix des VTR.....	39

C.	Evaluation des expositions	42
1.	<i>Analyse de la fréquence et de la durée d'exposition vie entière.....</i>	42
2.	<i>Synthèse des concentrations des polluants dans l'atmosphère</i>	43
3.	<i>Calcul des concentrations moyennes inhalées</i>	44
D.	Caractérisation des risques	44
1.	<i>Caractérisation des risques pour les effets avec seuil.....</i>	45
2.	<i>Caractérisation des risques pour les effets sans seuil</i>	47
E.	Impact sanitaire d'une attaque d'atténuation.....	49
1.	<i>Résultats sur la mise en œuvre</i>	49
2.	<i>Impact sur les concentrations lors d'un incendie</i>	49
3.	<i>Impact sur les risques sanitaires.....</i>	50
V.	Discussion	52
A.	Les incertitudes	52
B.	La surestimation du risque.....	53
C.	La sous-estimation du risque.....	53
D.	Les limites	53
VI.	Préconisations et pistes de réflexion	54
A.	La méthode Skelleftea adaptée à la BSPP	54
B.	Changement dans l'organisation de la lutte contre l'incendie.....	55
1.	<i>L'attaque d'atténuation à la BSPP.....</i>	55
2.	<i>Le rôle renforcé de l'officier sécurité et du groupe RCP sur intervention</i>	55
3.	<i>Etablir 3 niveaux de dépollution post-incendie en fonction de l'importance du sinistre.....</i>	56
C.	Récapitulatif des mesures à prendre en compte	57
VII.	Conclusion.....	61
VIII.	Bibliographie	62
IX.	Liste des tableaux et figures	64
X.	Annexes.....	65

I. Introduction

Tout au long de sa carrière, le sapeur-pompier est exposé à une variété de risques autant chimiques (gaz et fumées d'incendie), physiques (chaleur) que biologiques (sang, liquides biologiques). Cette exposition est diminuée en grande partie par les barrières thermiques et physiques des Equipements de Protection Individuelle (EPI).

Lors d'un incendie, les pompiers sont généralement soumis aux gaz et fumées libérés par la combustion ou la pyrolyse des matériaux. Les particules de suie à base de carbone absorbent les substances volatiles et se déposent à la surface des vêtements et des équipements. Elles peuvent alors contaminer les milieux environnants, être inhalées ou entrer en contact avec la peau des pompiers. [1][2] L'augmentation de la température corporelle, associée à un effort physique, à la chaleur de l'incendie et au port des EPI, provoque la sudation et entraîne l'ouverture des pores de la peau, ce qui favorise l'absorption des contaminants par le contact cutané.

Composés de particules solides, de gaz et d'aérosols, ces contaminants sont particulièrement dangereux pour les pompiers car ils sont toxiques, radiants, opaques, mobiles et inflammables, voire explosifs (phénomènes thermiques). La composition chimique de ces gaz et fumées dépend de la nature des matériaux et du phénomène de dégradation impliquée, tels que la pyrolyse ou la combustion (complète ou incomplète). Ils peuvent contenir pas moins de 200 contaminants.

En particulier, de nombreuses études démontrent la présence de substances cancérogènes dans les gaz et fumées d'incendie, notamment des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP), des Composés Organiques Volatils (COV) et des particules fines. [3][4] Il n'est pas rare que le pompier soit exposé au benzène, au toluène, au dioxyde de soufre (SO_2), aux aldéhydes, aux acroléines, au trichloréthylène, etc. Si des mesures de prévention adéquates ne sont pas prises (port de l'appareil respiratoire isolant, mesures d'hygiène...) cette exposition peut mener à une intoxication immédiate ou à une maladie irréversible et, dans certains cas, à la mort. De plus, les effets sur la santé peuvent se manifester longtemps après l'exposition, comme pour les cas de cancers.

Plusieurs études épidémiologiques ont démontré la corrélation entre une exposition aux fumées et gaz d'incendie et le développement de cancers notamment des cancers de la prostate et de la peau. [5][6]

Récemment, le National Institute of Standards and Technology (NIST) et l'Underwriters Laboratories (UL) ont mené des expérimentations sur des méthodes d'extinction des incendies par l'extérieur. La principale motivation pour effectuer ces expérimentations dans des conditions réelles vient du fait que la dynamique du feu a beaucoup changé ces dernières années. Les habitations et le mobilier se sont modifiés significativement, le plastique et les matières synthétiques ont remplacé les matières naturelles. De plus, les constructions ont évolué, utilisant des nouveaux matériaux pour répondre à des normes basse consommation toujours plus importantes. La tactique opérationnelle des sapeurs-pompiers doit dès lors évoluer également. Les essais du NIST et de l'UL ont démontré l'efficacité d'une nouvelle technique opérationnelle : l'attaque d'atténuation. [7][8]

Il n'existe aucune étude en France sur cette attaque d'atténuation et encore moins sur la mesure de concentration des polluants dans un feu d'habitation lorsque l'attaque du sinistre est effectuée par l'extérieur. Cette technique d'extinction fait invariablement changer l'atmosphère viciée et diminue la température à l'intérieur du volume. La question qui se pose est de savoir si cette tactique diminue la concentration dangereuse des fumées et gaz d'incendie permettant ainsi la réduction des effets aigus chez les sapeurs-pompiers.

Fort de ce constat, la problématique de ce mémoire est d'évaluer les effets d'une attaque d'atténuation sur l'exposition des sapeurs-pompiers de Paris aux polluants atmosphériques lors de la lutte contre un sinistre en vue d'en mesurer l'impact sanitaire.

Sachant que des études épidémiologiques existent déjà, nous avons fait le choix pour répondre à cette problématique, de mener une approche d'Evaluation Quantitative du Risque Sanitaire (EQRS) en nous appuyant sur une quantification des temps d'exposition lors de l'attaque d'un incendie précédée d'une attaque d'atténuation. Nous chercherons également à quantifier l'exposition aux polluants dans le volume sinistré dès lors qu'une attaque d'atténuation a été réalisée.

Ce travail s'appuie sur la réalisation d'un protocole pour des essais réalisés conjointement entre le Laboratoire Central de la Préfecture de Police (LCPP) et la Brigade des Sapeurs-Pompiers de Paris (BSPP). Des résultats seront proposés pour appuyer l'intérêt d'une telle étude.

Ce mémoire s'articule de la manière suivante :

La première partie est consacrée à la présentation de la Brigade de sapeurs-pompiers de Paris et à une revue de littérature qui aura pour but de présenter l'état des connaissances sur le sujet.

La deuxième partie vise à décrire la méthodologie utilisée, en suivant les étapes de la démarche d'EQRS. Pour cela, nous soulignerons dans un premier temps l'inventaire des polluants émis lors d'un incendie. Dans un second temps, nous détaillerons et affinerons le centre de secours virtuel représentatif de l'ensemble des centres de secours de la BSPP élaboré par monsieur J. Lanfranca et D. Charlier.

La troisième partie présente les résultats de ce travail. Tout d'abord, nous analyserons les résultats des expérimentations menées et nous en déduirons une quantification de l'exposition des sapeurs-pompiers. Ensuite, les résultats de l'EQRS réalisée seront exprimés sous forme de quotients de danger pour les polluants à effet avec seuil et un excès de risque pour les polluants à effet sans seuil. Les risques attendus avec et sans attaque d'atténuation seront comparés.

Enfin, dans une dernière partie, nous discuterons des principales limites de ce travail et nous proposerons une série de mesures de prévention visant à limiter ou prémunir contre les expositions.

II. Contexte

A. Présentation de la BSPP

1. Histoire

Créé le 18 septembre 1811 par Napoléon à la suite de l'incendie de l'ambassade d'Autriche, le bataillon de sapeurs-pompiers de Paris est le premier corps de pompiers en France placé sous autorité du préfet de police. Le 1^{er} mars 1967, le président de la République crée la Brigade de sapeurs-pompiers de Paris, commandée par un officier général, pour répondre à l'émergence du pompier de mégapole. Elle est aujourd'hui le troisième plus important corps de sapeurs-pompiers au monde après New York et Tokyo et le seul à être entièrement composé de militaires.

2. Organisation

Forte de 8 425 militaires avec environ 2 100 personnes de garde ou d'astreinte par jour, la BSPP couvre les 124 communes de Paris et sa petite couronne (Hauts-de-Seine 92, Seine-Saint-Denis 93 et Val-de-Marne 94) ainsi que les aéroports de Paris-Charles de Gaulle, Paris-Orly et Paris-le Bourget. Ce territoire de compétence unique en France concentre, sur une petite superficie de 800 km², une forte densité de population de 6,5 millions d'habitants, à laquelle viennent s'ajouter chaque jour 2 millions de franciliens et 10 millions de personnes en transit. En plus de la protection et de la lutte contre les incendies, la Brigade concourt à l'évaluation et la prévention des risques, à la protection et à la lutte contre les autres accidents, sinistres et catastrophes. Elle est chargée de :

- la préparation des mesures de sauvegarde et l'organisation des moyens de secours ;
- la protection des personnes, des biens et de l'environnement ;
- les secours d'urgence aux personnes en détresse ou victimes d'accidents, de sinistres ou de catastrophes ainsi que leur évacuation.

Elle exécute des missions de compétence partagée notamment :

- l'évaluation et la prévention des risques technologiques ou naturels ;
- les secours d'urgence aux personnes.

Elle se compose de trois groupements opérationnels dénommés « Groupement d'Incendie et de Secours » (GIS) qui rassemblent vingt-quatre compagnies et défendent soixante-quatorze secteurs opérationnels. (Figure 1)

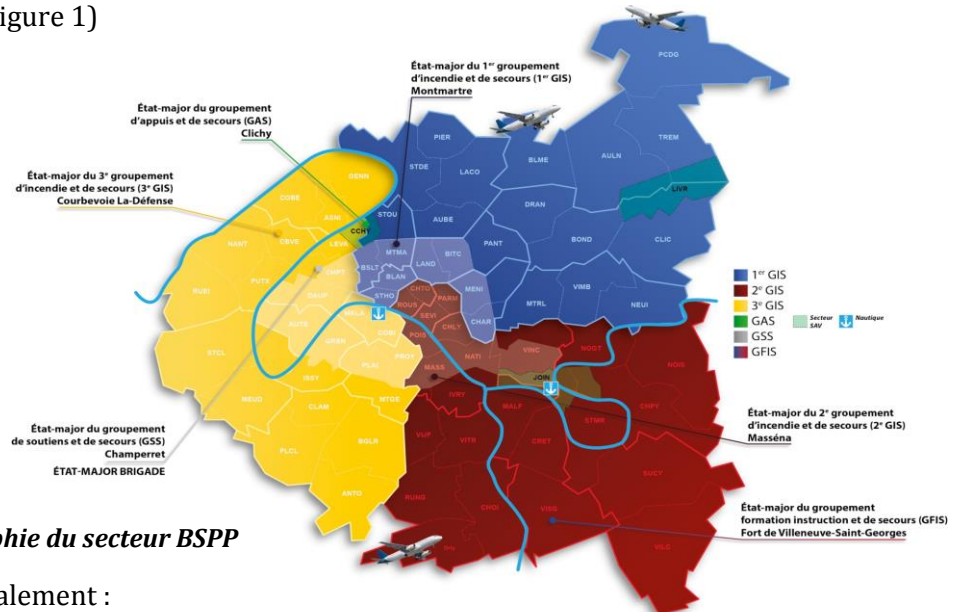


Figure 1. Cartographie du secteur BSPP

La Brigade se compose également :

- d'un Groupement de Formation d'Instruction et de Secours (GFIS) en charge de l'instruction, de l'éducation, de la formation morale, physique, complémentaire, technique et tactique ;
- d'un Groupement d'Appui et Secours (GAS) qui concentre l'ensemble des capacités d'interventions spécialisées notamment celles pour les interventions en milieux périlleux, aquatique ou subaquatique, la recherche et le sauvetage en milieu urbain, les interventions à caractère Nucléaire, Radiologique, Biologique ou Chimique (NRBC). Il permet un appui au profit d'établissements stratégiques situés en dehors de la plaque parisienne avec le centre spatial guyanais de Kourou et le centre d'essais et de lancement de missiles de Biscarosse ;
- d'un Groupement des Services et de Secours (GSS) qui est en charge du soutien opérationnel de la BSPP dans les domaines administratif, technique et logistique. Ces détachements ont pour rôle le conseil et l'assistance dans l'évaluation des risques de la sécurité civile et la participation à la préparation des mesures de sauvegarde et d'organisation des moyens de secours.

3. Conception tactique

Le cadre juridique de l'organisation de la BSPP et des missions conduites sur son secteur de compétences repose sur différents textes rappelés dans le Schéma Interdépartemental d'Analyse et de Couverture des Risques (SIDACR). Complété par le Règlement Opérationnel (RO), la note de service annuelle fixant les déploiements des moyens et le BSP 118 (sur les règles d'engagement sur feu), ces documents encadrent l'organisation et le fonctionnement du service d'incendie et de secours. Ils définissent le concept d'engagement du départ de première intervention pour feu avec un volume d'engins nommé « Départ Normal » (DN) qui se compose de deux engins-pompes et d'un moyen élévateur aérien. Commandé par un sapeur-pompier appelé « chef de garde », le départ normal est dimensionné pour répondre à un feu

d'appartement de 70 m² situé en étage, accessible aux moyens élévateurs aériens et restant dans son volume. Articulé pour permettre au chef de garde de manœuvrer face à un sinistre, l'engagement du DN repose également sur un ensemble d'actes réflexes et de fondamentaux tactiques dévolus à chacun des engins qui le compose. [9]

L'engagement opérationnel des engins se fait en appliquant méthodiquement la Marche Générale des Opérations (MGO). Celle-ci définit la conduite à suivre lors d'un feu d'habitation, notamment l'extinction du sinistre qui se fera exclusivement par les communications existantes. Le premier engin-pompe composé de deux équipes et d'un chef d'agrès emprunte la cage d'escalier et se rend dans l'appartement sinistré pour lutter et mener l'attaque du feu. Le second engin-pompe composé de deux équipes et du chef de garde reconnaît l'ensemble du bâtiment afin d'écarter tout risque de propagation de l'incendie. Le moyen élévateur aérien est à la disposition du chef de garde pour réaliser les sauvetages éventuels et/ou les reconnaissances d'appartements inaccessibles par l'intérieur. Dès lors, les pompiers sont exposés aux gaz et fumées d'incendies pendant toute la durée de l'opération à l'intérieur du volume concerné.

Un objectif intermédiaire de ce mémoire est de proposer un protocole d'essais pour étudier une nouvelle méthode d'extinction afin de réduire le temps d'exposition lors de l'attaque du sinistre : l'attaque d'atténuation.

4. Outils disponibles

Pour développer les outils à disposition de la Brigade et pour son bon fonctionnement, nous utiliserons la méthode FOTH (Facteur Organisationnel, Technique et Humain). Cette méthode permet de faire la liste exhaustive des outils à disposition de la BSPP contre les expositions des intervenants lors de la lutte contre les incendies.

a) Facteur organisationnel

Le commandement opérationnel de la Brigade s'articule autour de l'échelon tactique au niveau des groupements et de l'échelon opératif à l'état-major Brigade, subordonné à la préfecture de zone, échelon stratégique.

La Direction des Opérations de Secours (DOS) appartient au préfet de police ou, le cas échéant, à l'autorité déléguée (préfet des départements 92, 93 et 94). Le Commandant des Opérations de Secours (COS) désigné est chargé, sous l'autorité du DOS, de la mise en œuvre de tous les moyens publics et privés mobilisés pour l'accomplissement des opérations de secours.

La responsabilité du commandant organique d'une formation est constante et totale. Qu'il soit ou non présent sur place, il est responsable devant ses supérieurs de l'action de ses subordonnés. Son action dépend des moyens, de l'organisation et de l'état des matériels dont il dispose, mais surtout de la valeur et du moral qu'il a su faire naître et maintenir chez ses subordonnés.

La responsabilité de l'intervention incombe à la personne sur place qui occupe le plus haut rang dans la chaîne de commandement opérationnel (chef d'agrès, chef de garde, officier de garde compagnie, officier supérieur de garde groupement, colonel de garde et commandant opérationnel Brigade). [10]

Le commandant des opérations de secours

Le COS est l'officier, le sous-officier ou le gradé qui, sur une intervention, commande l'action des moyens engagés. Il se retrouve souvent à la tête d'un ensemble de moyens : il coordonne alors leurs actions.

Le chef de secteur

Le chef de secteur commande à vue généralement plusieurs chefs d'agrès ou de détachements à l'aide desquels il organise son chantier. En permanence, il conserve le recul suffisant pour

apprécier et anticiper l'évolution du sinistre sur son secteur, et coordonner l'ensemble des moyens placés sous ses ordres. Il n'a pas vocation à s'engager.

L'officier sécurité

En cas de risque grave menaçant tout ou partie des intervenants lors de l'application de la MGO, il a les compétences pour faire prendre aux chefs d'agrès ou de secteurs, en relation le cas échéant avec les experts présents, les mesures immédiates de préservation nécessaire, avant d'en rendre compte au COS.

b) Facteur technique

La protection de la population est un automatisme chez le sapeur-pompier engagé en opération. Mais ce dernier doit également se protéger personnellement contre tout risque induit par l'événement.

Le port des EPI n'est en aucun cas une option. Il est du devoir de chaque sapeur-pompier engagé sur opération de se protéger en portant correctement les EPI adaptés. Il est de la responsabilité du chef d'agrès, puis du COS de définir la tenue en fonction de l'intervention et de la zone d'engagement ainsi que de la faire revêtir.

Les équipements de protection individuelle de 3^{ème} catégorie

Les EPI sont soumis à un ensemble de normes d'imposition obligatoire subséquentes à la directive européenne 89/686/CEE en ce qui concerne les niveaux de protection. Le Code du travail impose à l'employeur les obligations suivantes : choisir les EPI adaptés aux risques et aux conditions d'emploi, mettre les EPI gratuitement à disposition, s'assurer de leur utilisation effective, donner les moyens d'assurer la maintenance et remplacer les EPI défectueux.

L'EPI constitue la tenue de protection du sapeur-pompier de Paris. Cette dotation est confiée à l'utilisateur qui en est responsable. Elle se compose :

- d'un appareil respiratoire isolant ;
- d'une tenue de protection textile ;
- d'un casque ;
- d'une cagoule ;
- d'une paire de gants d'attaque et de déblai ;
- d'un sous-vêtement d'intervention ;
- de bottes d'incendie.

L'Appareil Respiratoire Isolant (ARI)

L'ARI est employé systématiquement dès lors qu'il y a un risque avéré ou supposé dans la qualité de l'air respiré. Cet EPI a pour but de créer et de maintenir une atmosphère respirable isolée de l'air extérieur pollué. Le personnel protégé par ARI n'opère jamais de manière isolée.

Le matériel de ventilation

La mission de ventilation consiste à mettre en œuvre, si nécessaire, des moyens de désenfumage existants ou s'assurer de leur déclenchement automatique. Lorsqu'il n'existe aucun dispositif de ventilation sur les lieux, il est judicieux d'utiliser des matériels de ventilation adaptés à la configuration des lieux et du sinistre pour maîtriser le sens du tirage.

Le matériel de détection

Le détecteur portatif de monoxyde de carbone (CO) est un appareil mis en place dans les engins de première intervention. Portable, antidéflagrant et autonome, il est destiné à la détection du CO dans l'atmosphère. Il permet de surveiller et d'indiquer en temps réel la concentration de ce gaz.

Le détecteur multigaz « ALTAIR 4X » est un appareil portable et autonome destiné à la détection de gaz dans l'atmosphère. Il permet la détection simultanée de quatre gaz :

- Le méthane (CH₄) ;
- Le monoxyde de carbone (CO) ;
- L'oxygène (O₂) ;
- L'hydrogène sulfuré (H₂S). [11]

c) **Facteur humain**

Le facteur humain est mis en avant par la formation. D'abord dans sa formation initiale puis tout au long de sa carrière, le sapeur-pompier de Paris est encadré et formé pour lui permettre de réaliser ses missions dans les meilleures conditions possibles. Le groupement formation parvient à maîtriser la sphère formative et le panel des techniques et des connaissances du pompier du XXI^{ème} siècle, notamment en s'appuyant à la fois sur un système de formation réactif, flexible et sur un équilibre délicat entre tradition et modernité. Le GFIS est à ce jour le premier organisme de sapeurs-pompiers certifiée ISO 9001.

Par ailleurs, le pompier bénéficie d'un suivi médical renforcé et annuel. La santé physique du pompier est primordiale dans le cadre de son activité. La sélection d'entrée est une des plus sévères de l'armée de terre et, chaque année, le sapeur est évalué par un contrôle physique et sportif remettant en cause son aptitude incendie. Cette préparation physique et le suivi médical tout au long de la carrière du pompier sont un atout indéniable pour la santé et la sécurité de l'homme.

B. **Contexte de la problématique dans l'entreprise**

Le 13 mars 2015, deux sapeurs-pompiers de Paris sont victimes d'un phénomène thermique dans l'incendie d'un pavillon à Livry-Gargan. Ils décèdent de leurs blessures quelques jours plus tard. Ce tragique accident nous rappelle que le risque fait partie de notre métier et qu'il faut perpétuellement améliorer et revoir nos conditions de travail. Dans ce but, et sous la volonté du général commandant la brigade, il est important d'étudier des nouvelles conceptions tactiques pour éteindre les feux notamment en réduisant les expositions aux sources de danger des sapeurs-pompiers. L'attaque d'atténuation répond parfaitement à cette demande.

C. **Dispositions réglementaires**

La spécificité de la BSPP, par son secteur de compétence opérationnel interdépartemental et son statut militaire, et sa subordination au préfet de police, est régie par des dispositions réglementaires spécifiques.

1. **Par le code de la défense et les textes suivants :**

- Arrêté n°2004-17846 du 24 août 2004 du Préfet de police, portant sur la délégation de compétences aux préfets des départements des Hauts-de-Seine, de la Seine-Saint-Denis et du Val-de-Marne dans le domaine du secours et de la défense contre l'incendie ;
- Arrêté n°2007-20284 du 26 mars 2007 du préfet de police, portant sur l'approbation du plan rouge alpha ;
- Arrêté n°2008-00191 du 21 mars 2008 du préfet de police, portant sur le règlement opérationnel de la BSPP.

2. **Par des obligations réglementaires :**

- Le Code Général des Collectivités Territoriales (CGCT) ;
- Le code de la santé publique : articles L 6311-1 et suivants ;
- Le code de la sécurité intérieure : articles R 1321-19 et suivants, article R 3222-14 et suivants ;
- La loi de modernisation de la sécurité civile n°2004-811 du 13 août 2004 ;
- La loi relative à l'aide médicale d'urgence n°86-11 du 6 janvier 1986 ;
- Le décret n°2005-1157 du 13 septembre 2005 relatif au plan ORSEC et pris pour application de l'article 14 de la loi n°2004-811 du 13 août 2004 de modernisation de la sécurité civile ;

- Les directives générales sur le secours à nombreuses victimes interdépartementales et zonales ;
- Le SIDACR (arrêté préfectoral) dont la rédaction est prévue à l'article R 1321-23 du code de la défense ;
- Le décret n°2010-972 du 26 août 2010 relatif à l'organisation et au commandement des opérations de secours sur les aérodromes du Bourget, de Roissy-Charles-de-Gaulle et d'Orly ;
- L'arrêté du préfet de police portant sur le règlement opérationnel de la BSPP, et une note périodique fixant le déploiement opérationnel ;
- Le BSP 118.1 déclinant les textes de référence et l'organisation générale des secours ;
- Les règlements opérationnels série BSP 200. [10]

Contrairement aux services départementaux d'incendie et de secours, la BSPP n'a pas le statut d'un établissement public au sens de l'article L 1424-1 du CGCT.

3. En matière de santé et de sécurité au travail :

- La directive cadre du 12 juin 1989 sur la santé et la sécurité du travail n°89/391/CEE instaurant l'évaluation des risques à priori ;
- La loi du 31 décembre 1991 n°91-1414 qui transpose la directive cadre dans l'article L.4121-2 du code du travail ;
- Le décret du 5 novembre 2001 sur l'obligation de transcrire le résultat de l'évaluation des risques ;
- La décision de la cour de cassation sur l'amiante du 28 février 2002 instaurant la sécurité comme une obligation de résultat ;
- Le décret sur l'obligation de l'employeur du 17 décembre 2008 portant sur l'information des salariés des risques et l'accès au document unique.

L'article L. 4121-2 du code du travail détaille les mesures de prévention prévues à l'article L. 4121-1 du code du travail :

1. Eviter les risques ;
2. Evaluer les risques qui ne peuvent être évités ;
3. Combattre les risques à la source ;
4. Adapter le travail à l'homme, en particulier en ce qui concerne la conception des postes de travail ainsi que les choix des équipements de travail et des méthodes de travail et de production, en vue notamment de limiter le travail monotone et cadencé et de réduire les effets de ceux-ci sur la santé ;
5. Tenir compte de l'état de l'évolution et de la technique ;
6. Remplacer ce qui est dangereux par ce qui n'est pas dangereux ou par ce qui est moins dangereux ;
7. Planifier la prévention en y intégrant dans un ensemble cohérent la technique, l'organisation du travail, les conditions de travail, les relations sociales et l'influence des facteurs ambiants notamment les risques liés au harcèlement sexuel ;
8. Prendre les mesures de protection collective en leur donnant la priorité sur les mesures de protection individuelle ;
9. Donner les instructions appropriées aux travailleurs.

Il est important de souligner que le sapeur-pompier à la Brigade est soumis aux conditions de travail suivantes :

- Rythmes de travail : jusqu'à 72 heures avec 3 nuits successives ;
- Contraintes physiques marquées : manutention manuelle de charges lourdes ;
- Environnement physique agressif : agents chimiques dangereux, y compris les poussières et les fumées, activités exercées en milieu hyperbare, températures extrêmes.

De plus, le statut militaire du personnel de la BSPP est régi également par la loi portant sur le statut général des militaires. Celle-ci permet de déroger aux obligations du Code de travail notamment lors d'une mission, d'une opération ou de la préparation opérationnelle.

D. Etat de l'art sur les risques sanitaires associés à l'exposition aux fumées d'incendie

1. Revue de la littérature

Il existe de nombreuses études qui ont démontré les conséquences sur la santé des expositions aux fumées et gaz d'incendie. Pour synthétiser les connaissances, nous avons choisi de garder les études les plus récentes dans le tableau n°1.

Etudes		Origine	Date
Mortality and cancer incidence in a cohort of male paid Australian firefighters	1	Occupational and Environmental Medicine	2016
Mortality and cancer incidence in a pooled cohort of US firefighters from San Francisco, Chicago and Philadelphia (1950–2009)	2	Occupational and Environmental Medicine	2015
Cancer incidence 45 years of follow-up in five Nordic countries	3	Occupational and Environmental Medicine	2014
Cancer Risk Among Firefighters: A Review and Meta-analysis of 32 Studies	4	Occupational and Environmental Medicine	2006
French Firefighter Mortality, Analysis Over a 30 years Period	5	American Journal of Industrial Medicine	2015

Tableau n°1. Etudes épidémiologiques sur les expositions aux fumées et gaz d'incendie chez les pompiers

a) Synthèse des termes utilisés dans les études ci-dessous [12]

Le RIS : c'est le rapport entre le nombre observé et le nombre prévu de nouveaux cas d'une maladie, dans une région donnée et sur une période déterminée. Le nombre prévu est fondé sur les taux spécifiques en fonction d'un facteur particulier, pour la région étudiée et sur la même période.

Le RMS : c'est le rapport entre le nombre observé et le nombre prévu de nouveaux décès pour une maladie, dans une région et sur une période donnée de temps. Le nombre prévu est fondé sur les taux spécifiques en fonction d'un facteur particulier dans la même région et sur la même période de temps.

b) Etude n°1 sur les pompiers Australiens [6]

Cette étude concerne une cohorte de 17 394 pompiers australiens à plein temps et 12 663 à mi-temps entre 1980 et 2011. La mortalité et l'incidence de cancers sont comparées à la population générale en se basant sur le registre national de décès australien et la base de cancers australien. L'étude établit un Rapport d'Incidence Standardisé (RIS) de 1.23 (IC 95% 1.10-1.37) et 1.51 (IC 95% 1.28-1.77) respectivement pour les pleins et les mi-temps pour le cancer de la prostate et un RIS de 1.45 (IC 95% 1.26-1.66) et 1.43 (IC 95% 1.15-1.76) pour les cancers de la peau.

c) Etude n°2 sur San Francisco, Chicago et Philadelphie [13]

Cette étude épidémiologique porte sur une cohorte de 29 993 pompiers américains dans les villes de San Francisco, Chicago et Philadelphie entre 1950 et 2009. La mortalité par cancer chez les sapeurs-pompiers est comparée à la population générale américaine via leur table de

mortalité. Le Rapport de Mortalité Standardisé (RMS) est déterminé pour 92 causes de cancer. Les résultats montrent un RMS de 1.14 (IC 95% 1.10-1.18) notamment avec les cancers de la peau pour un RMS de 2.00 (IC 95% 1.03-3.49).

d) Etude n°3 sur les pays nordiques

Cette étude porte sur une cohorte de 16 422 pompiers dans les pays d'Islande, Norvège, Suède, Finlande et Danemark. L'objectif de cette étude est de comparer les types de cancers chez les pompiers avec le registre de cancers des 15 millions de personnes des pays nordiques pour la période 1961-2005. L'étude a calculé un RIS. Elle montre un excès de risque dans la catégorie d'âge 30-49 pour le cancer de la prostate (RIS=2.59 avec un IC 95% 1.34-4.52) et le cancer de la peau (RIS=1.62 avec un IC 95% 1.14-2.23).

e) Etude n°4 sur une méta-analyse [14]

Une méta-analyse a regroupé 32 études pour déterminer le risque de développer un cancer chez les sapeurs-pompiers professionnels. Elle obtient également un résultat élevé de risque du cancer de la peau (RMS 1.53 avec un IC 95% 1.21-1.94) et du cancer de la prostate (RMS 1.28 avec un IC 95% 1.15-1.43).

f) Etude n°5 sur les pompiers français [15]

Cette étude compare 10 829 pompiers professionnels employés en 1979 avec la population générale entre 1979 et 2008. Les pompiers sont identifiés dans 89 départements, ce qui représente environ 93% de la population professionnelle. Aucun excès de risque n'est démontré dans cette cohorte notamment avec un RMS de 0.81 (IC 95% 0.77-0.85) pour toutes les causes de mort confondues. Ce résultat serait dû à l'effet du travailleur sain.

g) Analyse de la mortalité des sapeurs-pompiers professionnels actifs au 1^{er} janvier 1979 [16]

Il existe une seconde étude française qui porte sur l'analyse de la mortalité des sapeurs-pompiers professionnels en France et qui est conduite entre 2007 et 2011 avec l'appui du fond national de prévention (la cohorte CPRIM). Ce travail permet de dresser un bilan de la mortalité des sapeurs-pompiers actifs sur une période de 30 ans et dont les principaux éléments sont les suivants : une sous-mortalité prononcée dans les âges jeunes, reflétant leur excellent état de santé initial lié au mode de recrutement ;

- Une disparition de cette sous-mortalité dans les âges élevés ;
- Une mortalité par cancer non statistiquement différente globalement de celle de la population générale (45% des décès sont dus à un cancer) ;
- Par contre, une surmortalité modérée pour certains types de cancers : sur 732 tumeurs malignes, le cancer broncho-pulmonaire étant le plus fréquent (25 %), suivi par les cancers de la lèvre-cavité buccale-pharynx (9 %), les cancers du foie et des voies biliaires intra-hépatiques (6%), du pancréas (6 %) et des tissus lymphatiques et hématopoïétiques (6 %).

Cette étude donne un certain nombre d'informations sur les organes les plus atteints. Toutefois, elle concerne l'ensemble des sapeurs-pompiers professionnels sans distinguer les différentes expositions liées à leur métier.

2. Les études à la BSPP

Une étude de cohorte en 1995 est menée à la BSPP et publiée dans « l'European Journal of Epidemiology ». Le but de cette étude est d'examiner l'association des sapeurs-pompiers de Paris et les causes de décès. Cette cohorte étudie 830 hommes qui ont servi au minimum 5 ans à partir du 1^{er} janvier 1977. Ils ont été suivis pendant 14 ans jusqu'au 1^{er} janvier 1991. Lors de la comparaison avec la population générale, le taux de mortalité générale est plus bas avec un RMS de 0.52 (0.35-0.75) expliqué par le syndrome du travailleur sain. En revanche, les taux de

cancers génito-urinaires (RMS = 3.29), digestifs (RMS = 1.14), respiratoires (RMS = 1.12) sont significativement plus élevés. [17]

D'autre part, deux études ont été menées chez les sapeurs-pompiers de Paris par des élèves ingénieurs du Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM). L'une sur « l'impact sanitaire (aigu et chronique) de l'exposition aux gaz non cancérogènes chez les sapeurs-pompiers de Paris dans les locaux d'habitation... » et la deuxième sur « l'impact sanitaire chez les sapeurs-pompiers de Paris de l'exposition chronique aux polluants atmosphériques lors des phases post extinction des feux de contenants ».

La première étude établit, grâce à une Evaluation Quantitative du Risque Sanitaire (EQRS), que les sapeurs-pompiers de Paris sont exposés principalement sur les feux d'habitation au monoxyde de carbone. Concernant les expositions aiguës, le quotient de danger calculé est largement supérieur à 1. Sans qu'il soit possible de quantifier la survenue d'un effet toxique, il est établi que les sapeurs-pompiers de Paris sont exposés à un danger. Concernant les expositions chroniques, le résultat déterminé exclut, à priori, la survenue d'un effet sur la santé. [18]

La deuxième étude mesure les concentrations atmosphériques post-extinction des polluants les plus significatifs (CO, PM 10 et 2,5, benzène, formaldéhyde, total HAP) dans les zones sinistrées. Des essais ont également permis d'évaluer ces concentrations dans les cabines des engins-pompes ainsi que dans les locaux des casernes où sont manipulés les tenues, équipements et matériels d'intervention. Les risques sanitaires sont ensuite calculés en utilisant la démarche d'EQRS. Les résultats montrent notamment une probabilité significative d'excès de risque de 0,7 cas de cancers vie entière chez les sapeurs-pompiers de Paris en compagnie d'incendie. Cet excès impose une évolution des méthodes de travail passant par la définition d'une stratégie de maîtrise du risque. [19]

Ce mémoire utilisera ces résultats afin de proposer une évolution dans la conception tactique pour l'extinction d'un incendie dans les locaux d'habitation notamment avec l'attaque d'atténuation.

3. Les études sur l'attaque d'atténuation

Les changements dans la conception des bâtiments (normes BBC) et les matériaux modernes ont considérablement modifiés les feux d'habitation. Le mobilier à l'intérieur des habitations s'est diversifié passant d'éléments naturels (chêne, bois massif) à des composés synthétiques et de plastiques (bois d'agglomérés, mousse polyuréthane...). Les maisons ou appartements modernes peuvent atteindre un embrasement généralisé du volume 8 fois plus vite qu'il y a 50 ans. L'UL a effectué des expérimentations pour comparer les feux impliquant des combustibles modernes contre des feux avec des combustibles naturels. La salle traditionnelle est meublée avec des meubles en fibres naturelles, comme le coton et la laine. La salle moderne est meublée avec le même équipement mais avec des meubles construits en matières synthétiques notamment de la mousse de polyuréthane. Les résultats de ces expérimentations ont démontré que l'embrasement généralisé de l'ensemble du volume est survenu en moins de 5 minutes pour la salle moderne contre plus de 20 minutes pour la salle d'antan. [20]

Dans ce cadre, les pompiers américains ont réfléchi à l'évolution de leur doctrine opérationnelle pour améliorer leur sécurité lors des feux d'habitation. Des études du NIST, de l'UL et du Fire Department of New York (FDNY) démontrent l'efficacité d'éteindre un feu d'habitation par l'extérieur au moyen d'une lance en eau. Cette attaque est appelée « attaque d'atténuation ». Ces études ont été menées en juillet 2012 dans 20 bâtiments abandonnés construits en 1980 sur Governors Islands à environ un kilomètre au sud de Manhattan. Les expérimentations portent sur la ventilation à pression positive au moyen d'un ventilateur mécanique, le contrôle de l'anti-ventilation et des méthodes d'extinction par l'extérieur. L'ensemble de bâtiments est meublé à l'identique avec un lot de canapés, chaises, lits et autres fournitures. Chaque maison est équipée

d'environ 100 appareils de mesures de température, de flux thermiques et de concentrations de gaz.

Nous allons nous intéresser plus particulièrement aux essais concernant les méthodes d'extinction d'un sinistre par l'extérieur au moyen de l'attaque d'atténuation. Les objectifs de cette étude étaient d'évaluer lors de l'utilisation de cette technique :

- la réduction survenue de l'embrasement généralisé du volume ;
- la réduction d'exposition à des températures thermiques élevées chez les sapeurs-pompiers ;
- les conditions de survie des victimes.

Chaque maison est composée d'un rez-de-chaussée (une cuisine et un salon), d'un étage (trois chambres) et d'un sous-sol d'environ 80 mètres carrés chacun. Le sous-sol possède une fenêtre sur l'extérieur. (Figure 2)

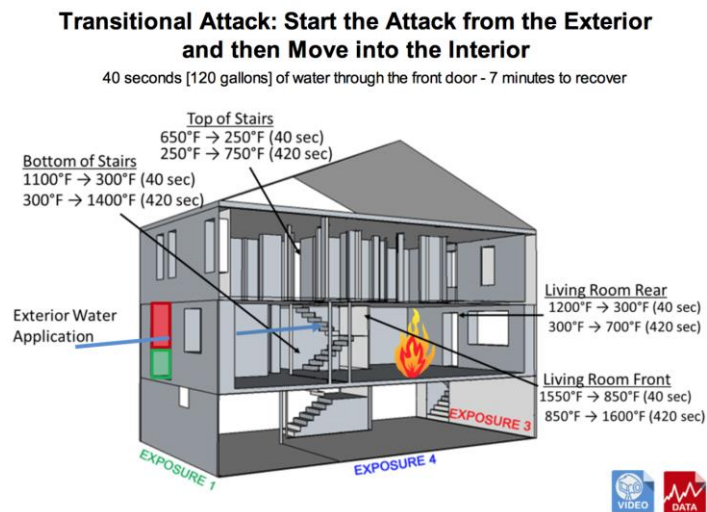


Figure 2. Plan de coupe d'une maison lors des essais de l'UL et du NIST

Exemple 1 : Feu dans le salon

Le premier essai présente un feu dans le salon au rez-de-chaussée. Après avoir obtenu un embrasement généralisé dans le volume, une attaque d'atténuation est effectuée à travers la porte d'entrée. L'eau n'atteint jamais le foyer principal dans le salon mais les effets de cette technique permettent de mesurer une baisse des températures dans l'ensemble de la maison :

- dans le salon : De 650 °C à 150 °C
- en bas des escaliers : De 982 °C à 420 °C
- en haut des escaliers : De 480 °C à 260 °C

Conclusion : le refroidissement des gaz et des fumées améliore considérablement les conditions intérieures même si l'eau n'atteint pas directement le foyer.

Exemple 2 : Feu dans le sous-sol

Le deuxième essai présente un feu de sous-sol. L'attaque d'atténuation est effectuée par l'extérieur à travers la fenêtre. La porte de la cage d'escalier donnant sur le rez-de-chaussée est ouverte. Les températures mesurées dans l'ensemble de la maison sont les suivantes :

- dans le sous-sol : De 920 °C à 150 °C
- en bas des escaliers : De 650 °C à 205 °C
- en haut des escaliers : De 315 °C à 95 °C

Conclusion : l'application de l'eau par cette technique améliore les conditions à l'intérieur dans tout le bâtiment. De plus, le feu ne se propage pas au rez-de-chaussée par la cage d'escalier.

Exemple 3 : Plusieurs feux simultanés dans la maison

Le dernier essai présente un feu dans la cuisine au rez-de-chaussée et un feu dans la chambre du milieu au 1^{er} étage. Les attentes de cet essai sont de voir si l'attaque d'atténuation pousse le feu dans les volumes attenants. Les valeurs enregistrées sont les suivantes :

- dans la cuisine : De 760 °C à 95 °C
- dans la chambre du milieu : De 315 °C à 150 °C
- dans la chambre attenante : De 260 °C à 150 °C

Conclusion : l'action de l'attaque d'atténuation ne pousse pas le feu et les températures à l'intérieur du bâtiment sont plus favorables à l'engagement de sapeurs-pompiers.

Ces essais montrent toute la pertinence d'une attaque d'atténuation lors d'un feu d'habitation avant l'engagement des sapeurs-pompiers. Pour l'adapter au concept tactique de la BSPP, il convient d'évaluer les concentrations à l'intérieur du volume lorsque l'attaque du feu est précédée par une attaque d'atténuation. Il paraît judicieux d'associer cette technique à la ventilation opérationnelle pour évaluer également la diminution des polluants atmosphériques au niveau du sinistre. Enfin, il est important de mesurer le temps d'exposition des équipes pour voir s'il diminue.

III. Méthodes

A. La méthode EQRS

1. Introduction

Les interactions entre la santé humaine et les faibles doses de polluants environnementaux ont été les premières concernées dans l'évaluation de risque, du fait de l'incertitude scientifique liée aux difficultés d'observation de tels phénomènes. L'EQRS a été formalisée en 1983 par le National Research Council des Etats-Unis (NRC, 1983.) La définition classiquement énoncée repose sur «...l'utilisation de faits scientifiques pour définir les effets sur la santé d'une exposition d'individus ou de populations à des matériaux ou à des situations dangereuses. » Ainsi, la place d'un jugement se fondant sur des convictions est aussi réduite que possible. [21]

2. Description de la méthode

Pour décrire la méthode, il faut d'abord définir le modèle du risque en EQRS. Il existe de multiples définitions pour expliquer le risque. Nous avons choisi de le définir pour la méthode EQRS comme la probabilité chez un groupe d'individus de développer une maladie lors d'une exposition entre une source de danger et une population. Le schéma ci-dessous résume ce choix de définition :

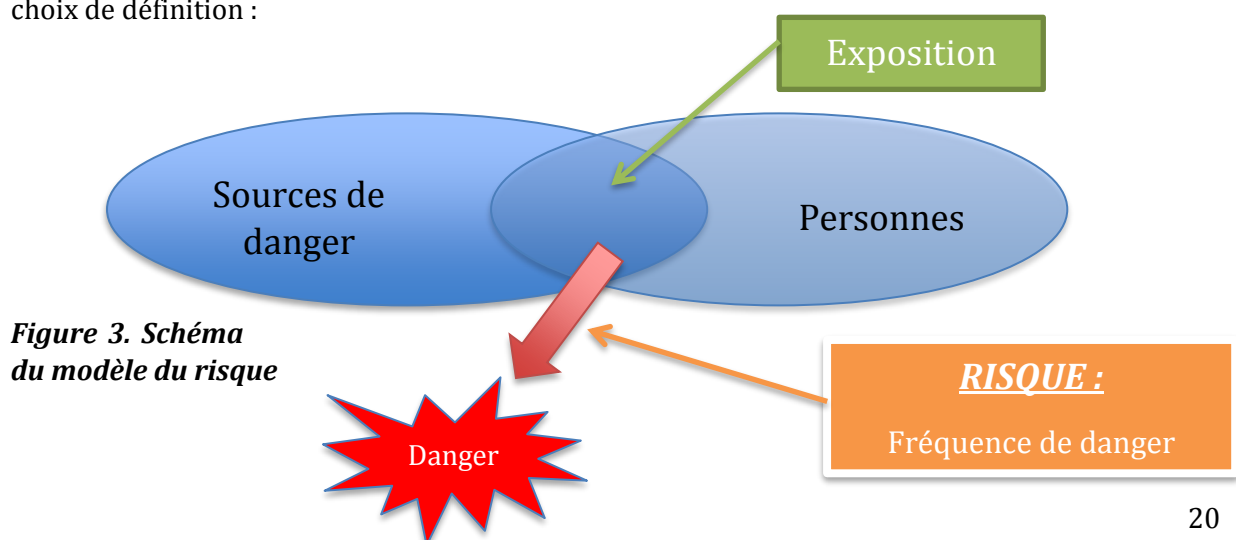


Figure 3. Schéma du modèle du risque

Ensuite le paradigme de l'évaluation des risques se divise en 4 étapes :

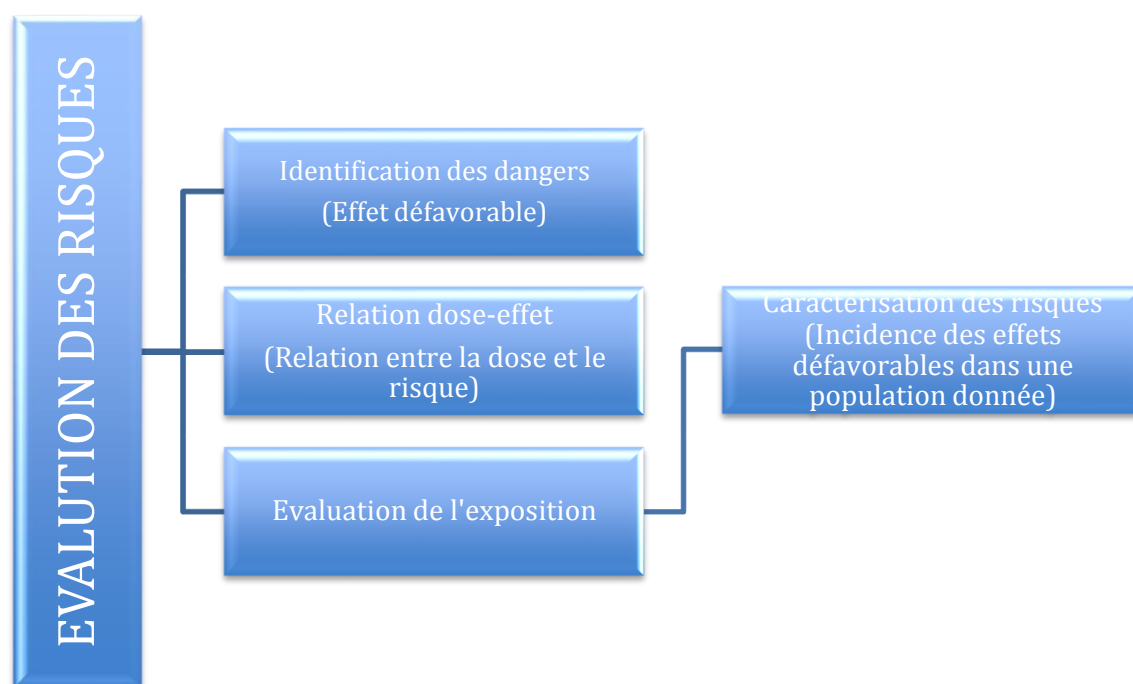


Figure 4. Paradigme de l'évaluation du risque

- L'étape 1 : l'identification des dangers consiste à répertorier les substances ou agents rejetés dans l'environnement et les informations sur les dangers (effets sanitaires indésirables) afférents à chacun d'entre eux. Une éventuelle sélection s'appuiera sur un certain nombre de critères tels que la quantité de substance rejetée, ses effets toxiques, la nature des données toxicologiques (animales ou humaines) ;
- L'étape 2 : la relation dose-effet consiste à rassembler, analyser et choisir des Valeurs Toxicologiques de Références (VTR) afin de connaître pour chaque niveau d'exposition (de dose) la probabilité d'émergence d'un effet adverse ;
- L'étape 3 : l'évaluation de l'exposition des populations conduit à déterminer la dose de polluant qui arrive au contact ou qui pénètre l'organisme. Pour cela, il faut décrire les populations selon l'exposition (à travers une matrice d'exposition) puis décrire les caractéristiques de l'exposition (niveau, fréquence, durée, voies d'absorptions...) ;
- L'étape 4 : la caractérisation du risque combine les informations en fonction des trois précédentes étapes. Elle établit le calcul du risque encouru pour les substances pour lesquelles un danger et une VTR associés existent et une exposition est déterminée.

3. Pertinence de la méthode selon les objectifs

Parce qu'elle permet de guider les décisions de protection sanitaire dans une situation d'incertitude, notamment avec l'apparition de nouveaux matériaux dans les bâtiments d'habitation, et qu'elle vise à organiser les connaissances disponibles, la méthode EQRS est la plus pertinente pour calculer un excès de risque sur la population des pompiers. Elle apprécie la qualité et fait la synthèse des résultats de l'ensemble des secteurs d'investigation, du niveau moléculaire à celui des populations, à travers une démarche systémique.

B. Inventaire des polluants

Lors des incendies dans les locaux d'habitation, le sapeur-pompier de Paris est exposé aux fumées et aux gaz produits lors du sinistre. Ces polluants sont tellement nombreux qu'il n'est pas possible d'en dresser une liste exhaustive. Nous avons choisi de dresser la liste des principaux polluants.

Les gaz et fumées d'incendies peuvent produire :

- *des polluants asphyxiants* comme le monoxyde de carbone (CO), le dioxyde de carbone (CO₂) ou le sulfite d'hydrogène (H₂S). Ils représentent les gaz les plus dangereux et sont souvent les sources d'émissions toxiques responsables des décès constatés ;
- *des polluants irritants* comme l'ammoniac (NH₃), le chlorure d'hydrogène (HCl), des particules, du monoxyde d'azote (NO), du phénol, du dioxyde de soufre (SO₂). Il s'agit des suies, des acides minéraux et des produits organiques irritants ;
- *des composés à toxicité spécifique : effets allergènes, mutagènes et cancérigènes* comme l'amiante, le benzène, le pyrène, le styrène, des HAP et certains métaux lourds. Des particules ultrafines >0,1 micron ont été détectées dans les fumées. Ces composés ne conduisent généralement pas à des effets aigus mais peuvent présenter des effets toxiques à long terme.

Le figure n°3 représente le synoptique de caractérisation du terme source de l'incendie afin d'expliquer la démarche générale suivie pour la détermination de la composition des fumées. [22]

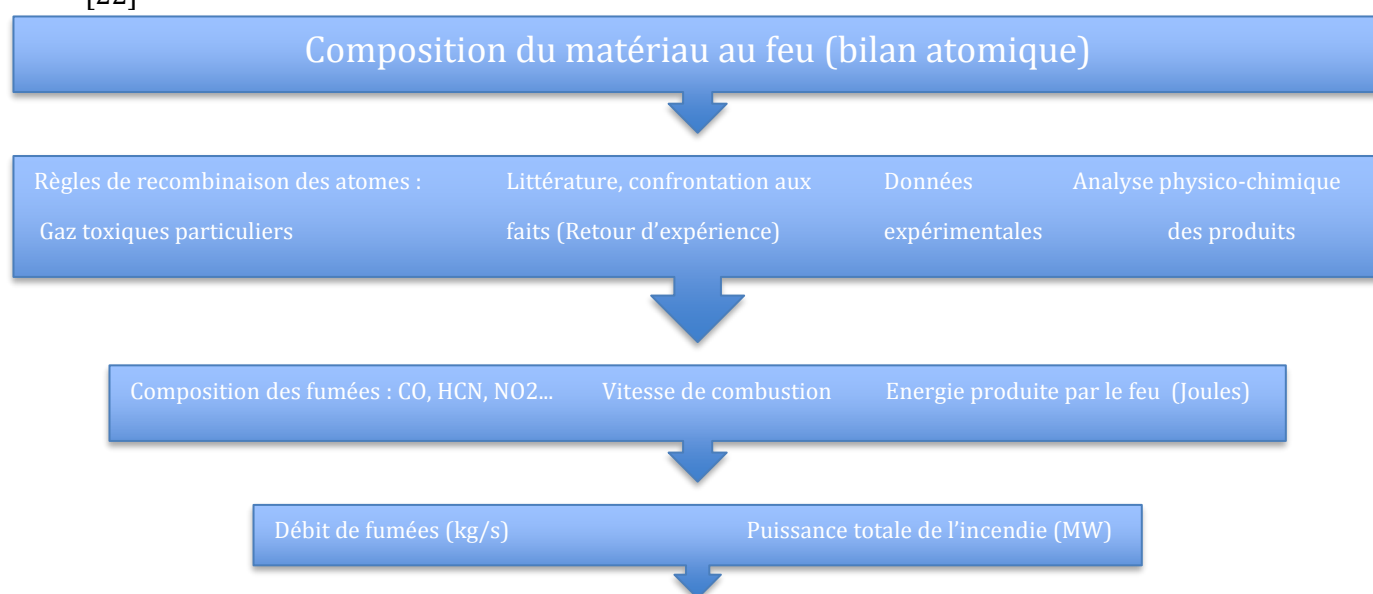


Figure 5. Synoptique de caractérisation du terme source de l'incendie

Nous allons détailler plusieurs grandes études sur la toxicité des fumées puis nous établirons une synthèse dans le tableau n°3.

Etudes		Origine	Date
Real-scale fire tests of one bedroom apartments with regard to tenability assessment	1	Fire Safety Journal / LCPP	2014
Exposure of Firefighters to Particulates and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	2	Journal of Occupational Environmental Hygiène	2014
Evaluation of Dermal Exposure to Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Firefighter	3	Centers for Disease Control and Prevention National Insitute for Occupation Safety and Health	2013
Cardiovascular and chemical exposure risks in modern firefighting	4	Illinois Fire Service Institute – IFSI Research	2013
Firefighter exposure to smoke particulates	5	Underwriters Laboratories	2010

Tableau n°2. Etudes sur la toxicité des fumées et gaz d'incendie

1. Etude n°1 du laboratoire central de la préfecture de police [23]

Dans cette étude, le LCPD reproduit deux différents scénarii dans deux chambres de 9m² d'un appartement. Comme dans la vie de tous les jours, ces chambres sont équipées de fournitures, de vêtements et de meubles à l'identique. Le premier test consiste en un feu de lit allumé accidentellement par une cigarette. La porte et la fenêtre restent fermées durant toute l'expérience et le feu décroît rapidement par manque d'oxygène. Le second test explore un feu de corbeille à papier. La porte reste ouverte et déclenche l'embrasement généralisé de la pièce. La pièce est équipée de nombreux matériels pour mesurer les polluants dans les fumées et gaz d'incendie.

Cette étude mesure dans les fumées les concentrations des gaz suivants : dioxygène (O₂), monoxyde de carbone (CO), dioxyde de carbone (CO₂), chlorure d'hydrogène (HCl), cyanure d'hydrogène (HCN), ammoniac (NH₃), oxyde nitrique (NO).

2. Etude n°2 du Journal of Occupational and Environmental Hygiène [3]

Une communauté académique de partenaires s'est développée avec le « Cincinnati Fire Department » dans le but de comprendre et de mesurer le taux d'HAP lors de l'exposition aux fumées d'incendies des sapeurs-pompiers. La population étudiée représente trois unités de pompiers professionnels servant dans deux casernes municipales. Dix hommes avec dix années et plus d'expérience sont recrutés. Chaque pompier doit, en plus de son équipement habituel, à la caserne comme sur intervention, porter un boîtier le « P-Trak » qui contient tous les équipements pour collecter deux échantillons de PM_{2.5} et d'HAP. Un second boîtier permet d'effectuer des mesures stationnaires en temps réel. La surveillance de l'air est conduite dans deux environnements différents : la caserne municipale et les scènes de lutte contre l'incendie au nombre de cinq pendant l'expérimentation. Le « P-Trak » sur les pompiers est remplacé tous les 3 jours par de nouveaux échantillons vierges et re-calibrés. Pour l'échantillonnage stationnaire, le boîtier est attaché à un trépied au plus fort de la zone de respiration.

Deux types de concentrations de particules sont mesurées au bureau de radioprotection de l'université de Cincinnati : la concentration en masse de particules fines PM_{2.5} et la concentration en nombre de particules de sous-micron dans la gamme de taille 0,02-1 micron.

Les résultats montrent qu'il y a un taux élevé de concentration du nombre de particules sur les scènes incendie mais également dans la cuisine de la caserne pendant la durée du repas avec un taux de 500,000 particules/cm³. Une moyenne pondérée sur 24 heures pour la concentration de PM_{2.5} de 143 microns/m³ observée est calculée à partir d'une concentration de masse moyenne de PM_{2.5} sur tous les événements de l'expérimentation (5178 microns/m³). Cette moyenne démontre que l'exposition des pompiers pendant leur garde de 24 heures peut dépasser la moyenne de 35 microns/m³ fixée par l'Environmental Protection Agency (EPA) bien que l'exposition par rapport à un changement individuel soit très variable.

De plus, de nombreux hydrocarbures aromatiques polycycliques sont identifiés sur la peau des pompiers grâce à l'application de lingettes en fin d'intervention. Les concentrations d'HAP analysées sont résumées dans le tableau ci-dessous :

HAP	N (%)	Masse moyenne par essuyage (micron/g)
Benz(a)anthracène	3 (15%)	0.11 (0.023)
Benzo(b,j,k)fluoranthène	13 (65%)	0.16 (0.049)
Benzo(a)pyrène	2 (10%)	0.09 (0.04)
Benzo(e)pyrène	1 (5%)	0.11
Chrysène	1 (5%)	0.10
Fluoranthène	3 (15%)	0.08 (0.03)

Phenanthrène	1 (5%)	0.15
Pyrène	6 (30%)	0.12 (0.02)

3. Etude n° 3 du Center for Disease Control and Prevention (CDC) et du National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) [1]

Cette étude est menée par l'Illinois Fire Service Institute à Urbana-Champaign, Illinois. Le protocole d'étude a été approuvé par le conseil d'examen institutionnel du NIOSH. Les critères d'inclusion pour l'étude comprennent :

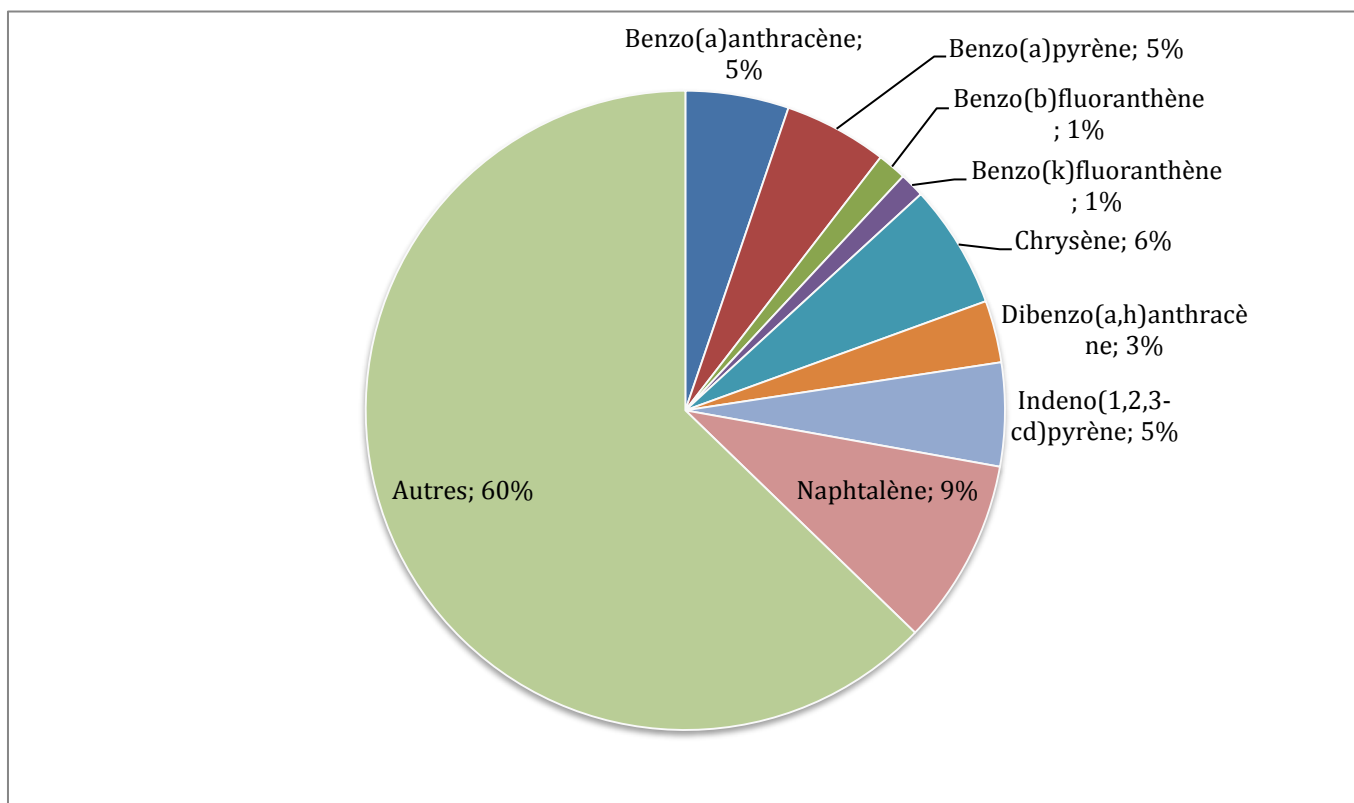
1. Non-fumeur - Pour éviter les faux positifs liés au tabagisme récréatif ;
2. Homme - Parce que la taille de l'étude était trop petite pour interpréter les différences de ce genre ;
3. 45 ans ou moins - Pour réduire la probabilité d'événements cardiovasculaires négatifs dont le risque augmente chez les plus de 45 ans ;
4. Des agents de lutte contre le feu qui ont suivi une formation d'instructeurs au Chicago Fire Department - Pour assurer un groupe de participants hautement qualifiés.

L'étude est réalisée sur deux cycles d'études séparés d'un an. Quinze pompiers ont participé à chaque cycle et chaque tour consiste en trois brûlages contrôlés (un brûlage par jour).

Les méthodes de surveillance de l'exposition des personnels et de la surveillance biologique sont résumées dans le tableau ci-dessous :

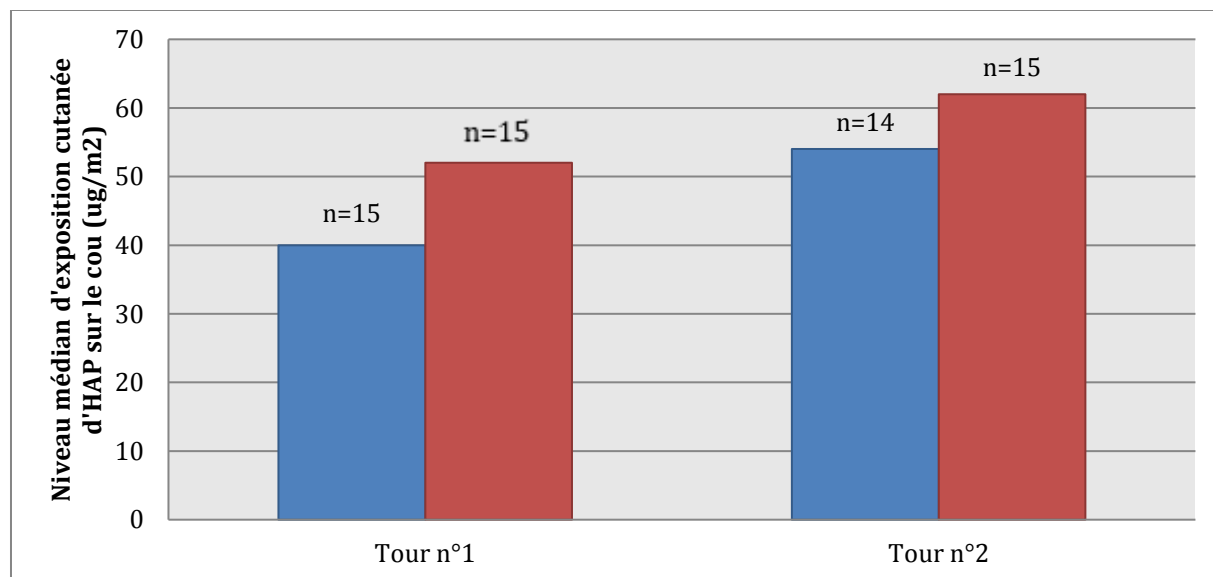
Type de mesure	Période d'échantillon	Analyse	Méthode d'analyse
Air	Exposition	Tout HAP (gaz et particules)	NIOSH méthode 5506
Exposition cutanée cou et bras	Pré et post-exposition	Tout HAP	NIOSH méthode 5506
Exposition cutanée main et visage	Post-exposition	Tout HAP	
Exposition cutanée scrotum	Pré et post-exposition	Tout HAP	
Urine	Pré, post, 3 heures et 6 heures	HAP et leurs métabolites	ELISA
Urine	Pré, post, 3 heures et 6 heures	Benzène métabolite	Liquid chromatography
Urine	Pré, post, 3 heures et 6 heures	Créatinine	Vitro Autoanalyser
Urine	Pré, post, 3 heures et 6 heures	Cotinine	Immulite 2000
Air expiré	Pré, post et 6 heures	Hydrocarbures aromatiques	NIOSH méthode 2549
Air expiré	Pré, post et 6 heures	Hydrocarbures aromatiques et semi-volatiles (HAP)	Gas chromatography / EPA

Les mesures d'exposition des HAP potentiellement cancérigènes et d'autres HAP mesurées dans les zones respiratoires du tour n°1 (n=14) sont résumées dans le schéma ci-dessous :



Les mesures d'exposition du cycle d'étude n°2 sont équivalentes aux mesures du cycle n°1.

Les mesures du niveau d'exposition cutanée médiane avant et après exposition des HAP sur le cou par cycle d'étude sont résumées dans le schéma ci-dessous :



Cette étude permet de démontrer la présence d'HAP dans l'air lors d'un incendie et de leur passage à travers les EPI des sapeurs-pompiers.

4. Etude n°4 de l'Illinois Fire Service Institute [24]

Quarante pompiers de l'Illinois, de la Géorgie, de l'Indiana, de l'Ohio, du Dakota du sud et du Wisconsin ont participé à cette étude. Ils effectuent quatre séances de brûlages pour l'étude. Afin

de mener cette étude de la façon la plus réaliste possible, chaque séance de brûlage se fait dans une structure ayant toutes les finitions intérieures et les caractéristiques d'une maison d'habitation individuelle. Chaque maison est composée de 4 chambres et une salle de bain et équipée de meubles et fournitures à l'identique. Des mesures de la fonction cardiovasculaire et l'exposition toxique (métabolites dans le sang, la respiration et l'urine) sont faites avant, immédiatement et après la lutte contre l'incendie (2 et 12 heures après récupération). Chaque pompier porte trois trains d'échantillonnage à l'extérieur de la veste de tenue de feu pour mesurer les concentrations atmosphériques d'HAP et de cyanure d'hydrogène (HCN).

Les premiers résultats indiquent une concentration élevée de retardateurs de flammes dont celui de flammes bromés (RFB), TBPH (2-ethylhexyl), TPP (Triphenil phosphate), TCP (Tricesyl phosphate), TDDCP (Tris1,3-dichloro-2-propyl). L'Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail (ANSES) a rendu un rapport d'expertise collective sur l'évaluation des risques liés à l'exposition aux retardateurs de flammes dans les meubles rembourrés. A partir des données publiées, l'ANSES souligne que :

- certains retardateurs de flammes présentent une toxicité sur la reproduction notamment le TCP et le TPBH ;
- le TPP est inscrit sur la liste des substances à évaluer par le REACH en raison d'un effet de perturbations endocriniennes potentielles ;
- le TDDCP est considéré comme potentiellement cancérigène pour l'homme par le règlement « Classification, Labelling, Packaging » (CLP) ;
- le TCP est suspecté d'exercer une neurotoxicité soit après l'exposition, soit à l'âge adulte, soit au cours du développement et peut également cibler le système immunitaire. [25]

Les seconds résultats révèlent une concentration d'HCN et de COV dans le salon pendant la phase active du feu et dans la chambre après la phase d'extinction. Les concentrations des HCN et COV sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Composés mesurés	Phase active (ppm)	Phase d'extinction (ppm)
HCN	340	1.2
Benzène	15	0.17
Toluène	0.069	0.0038
Ethyl Benzène	< 0.0004	0.0014
Xylènes	< 0.0008	0.0038

D'autres résultats montrent le niveau de contamination des surfaces (ng/cm²) en HAP des tenues de feu après le premier scénario :

Pré-intervention	Post-intervention	Post-décontamination
< 300	3 800	< 300

5. Etude n°5 de l'Underwriters Laboratories [26]

Elle étudie et analyse les gaz de combustion et les particules générées à partir de trois scénarios d'incendie : la structure résidentielle et les incendies automobiles, des tests d'incendie simulés à l'échelle réelle et des tests de feu à petite échelle basés sur des matériaux. Ces essais permettent d'enquêter sur la combustion de quarante-trois matériaux couramment utilisés dans les constructions résidentielles pour caractériser une variété de matériaux naturels, synthétiques et

multi-composants. L'UL calcule les taux de libération de la fumée, la taille des particules et la composition des gaz et des fumées.

Les concentrations de gaz dans l'incendie du salon dans un milieu ventilé sont résumées dans le tableau ci-dessous :

GAZ	Croissance du feu		Phase d'extinction	
	Concentration maximum (ppm)	Concentration totale (ppm-min)	Concentration maximum (ppm)	Concentration totale (ppm-min)
CO	5926.4	9685.5	7036.6	43747.7
Méthane	2717.2	33656.3	2438.2	3559
Ethylène	777.5	975.5	968.8	814.8
Ammoniaque	24.7	30.2	25.2	426.7
Acétylène	968.8	1352.9	1040.5	2890.1
Méthanol	726.5	793.6	602	1783.6
Phénol	1250.4	1294	1262.7	2706.4
Benzène	325.1	459.6	440.9	644.6
Formaldéhyde	3548.6	4463.4	2201.9	1747.3
Toluène diisocyanate	180.4	369.8	---	---

Les concentrations de HAP et de mercure dans la phase du feu active pour les incendies à grande échelle sont résumées dans le tableau ci-dessous :

HAP (mg/m ³)	Croissance du feu
Acenaphthylène	0.057
Acenaphtène	0.005
Anthracène	0.0045
Fluorène	0.017
Naphtalène	0.48
Phénanthrène	0.06
Fluoranthène	0.0047
Pyrène	0.0078
Mercure	0.0054

La densité et la répartition de la taille du nombre de particules lors de l'extinction des incendies à grande échelle sont résumées dans le tableau ci-dessous :

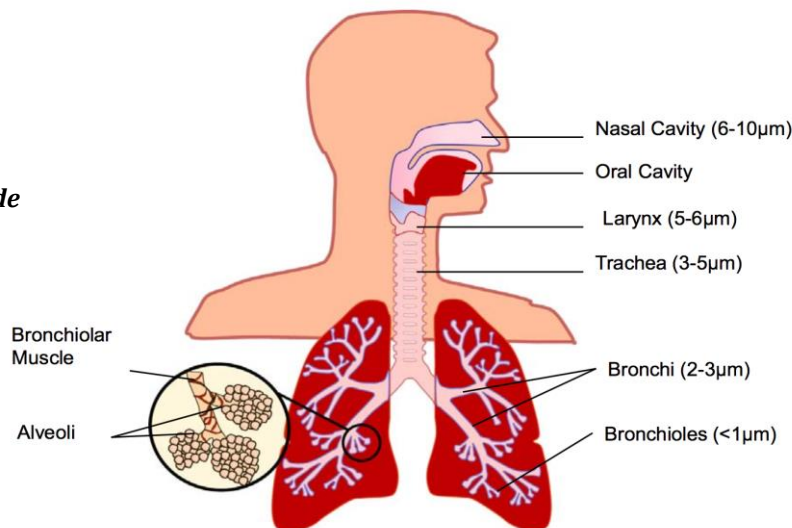
Pièces	Taille moyenne des particules (microns)	Densité moyenne (particules/cm ³)	Fraction de particules dans les tailles (microns)			
			0.01 – 0.11	0.11 – 1.0	1.0 – 2.5	2.5 - 10
Salon	0.078 ±0.021	5.92 ±2.82 10 ⁵	0.832 ±0.067	0.164 ±0.066	0.003 ±0.003	0.001 ±0.001
Salon ventilé	0.054 ±0.010	1.62 ±4.19 10 ⁶	0.903 ±0.040	0.097 ±0.040	0.000 ±0.000	0.000 ±0.000
Chambre	0.098 ±0.144	2.11 ±3.26 10 ⁶	0.840 ±0.293	0.158 ±0.289	0.001 ±0.004	0.000 ±0.001
Cuisine	0.083 ±0.023	6.34 ±8.26 10 ⁴	0.788 ±0.105	0.211 ±0.105	0.001 ±0.001	0.000 ±0.000
Grenier	0.088 ±0.018	1.20 ±1.01 10 ⁵	0.759 ±0.102	0.241 ±0.102	0.000 ±0.000	0.000 ±0.000
Bois composite	0.100 ±0.035	4.55 ±5.98 10 ⁴	0.701 ±0.190	0.298 ±0.190	0.000 ±0.000	0.000 ±0.000
Compartiment passager	0.046 ±0.037	1.96 ±0.62 10 ⁴	0.914 ±0.146	0.086 ±0.146	0.000 ±0.000	0.000 ±0.000
Compartiment véhicule	0.062 ±0.019	6.73 ±9.86 10 ⁴	0.878 ±0.077	0.121 ±0.076	0.000 ±0.001	0.000 ±0.000
Moyenne	0.054 ±0.010	5.26 ±7.90 10 ⁵	0.820 ±0.072	0.179 ±0.072	0.001 ±0.001	0.000 ±0.000

C. Synthèse des polluants et de leurs effets sur la santé

Nous avons choisi de ne pas garder les retardateurs de flamme car ils peuvent être considérés comme un risque émergent et doivent faire l'objet d'une étude particulière. Les impacts potentiels sur la santé des fumées et gaz d'incendie et leurs origines sont listés dans le tableau n°3. Les polluants retenus dans le cadre de cette étude sont indiqués dans le tableau qui suit avec un fond orangé.

Nous avons vu que les gaz et fumées d'incendie peuvent être considérés comme un risque de toxicité pour l'organisme. Conformément à la problématique de ce mémoire et en adéquation avec les principes généraux de prévention, le but est donc de supprimer ou à défaut de réduire l'exposition à ces polluants chez les sapeurs-pompiers de Paris en modifiant l'organisation de la lutte contre l'incendie.

Figure 6. Zones de dépôts de particules dans les voies respiratoires humaines



Polluant	Effet sur la santé	Origine
Ammoniac (NH ₃)	Irritant pour les yeux, la peau et les voies respiratoires. Maux de tête, salivation, brûlure de gorge, transpiration, nausées, vomissements. Une exposition prolongée provoque une toux ou un arrêt respiratoire.	Produit libéré dans le cas de certaines combustions de polyamides ou lors de la décomposition d'engrais.
Monoxyde de carbone (CO)	Asphyxiant interférant avec la capacité de transport d'oxygène du sang. Maux de tête, étourdissements, somnolences, nausées, évanouissements, coma et mort. Effets cardiaques : aggravation de l'angine induite par l'exercice.	Le monoxyde de carbone est produit par la combustion incomplète des déchets solides ou liquides.
Dioxyde de carbone (CO ₂)	Asphyxiant qui peut entraîner une accélération de la fréquence respiratoire, maux de tête, vertiges, tremblements, dépression respiratoire, convulsion, coma et mort.	Le dioxyde de carbone est produit par la combustion complète des déchets solides ou liquides.
Cyanure d'hydrogène (HCN)	Asphyxiant affectant les aspects fondamentaux du processus respiratoire. Faiblesse, maux de tête, confusion, nausées, et vomissements. Une exposition prolongée peut entraîner des pertes de conscience et la mort.	Produit libéré avec les polyamides, les polyacrylonitriles, les polyacrylonitriles butadiène styrène, les polystyrènes acrylonitrile et les polyuréthanes et les polymères nitrés. A 1000°C, les polyuréthanes libèrent la totalité de leur masse sous forme d'HCN.
Chlorure d'hydrogène (HCl)	Le chlorure d'hydrogène forme de l'acide chlorhydrique au contact des tissus du corps. Son inhalation peut causer de la toux, la suffocation, l'inflammation des parois nasales, de la gorge et du système respiratoire. Dans les cas plus graves, elle peut entraîner un œdème pulmonaire, une défaillance du système cardiovasculaire et la mort.	Le HCl se forme à partir du chlore contenu dans les déchets (PVC) et des vapeurs lors de la combustion des matériaux.
Acide fluorhydrique (HF)	Ce composé est extrêmement toxique. Dans le corps humain, l'acide fluorhydrique réagit avec les ions calciums et magnésium et peut endommager les organes dont le fonctionnement dépend de ces ions. Les symptômes peuvent n'apparaître qu'après plusieurs minutes voire plusieurs heures lorsque l'acide commence à réagir avec le calcium des os. En cas d'exposition massive, des complications graves, voire mortelles, peuvent survenir à la suite de l'hypocalcémie.	Du fait de sa capacité à dissoudre les oxydes, l'acide fluorhydrique est un réactif important dans les procédés de purification de l'aluminium et de l'uranium. Il peut être utilisé lors de la synthèse de nombreux composés organiques contenant du fluor, parmi lesquels le téflon et les gaz utilisés en réfrigération comme le fréon.
Sulfure d'hydrogène (H ₂ S)	Irritant et toxique neurologique. Maux de tête, étourdissements, nausées et diarrhées. Une exposition prolongée peut provoquer une insuffisance respiratoire, le coma et la mort.	Produit libéré dans les cas des polysulfones et d'autres polymères soufrés.

Oxydes d'azote (NOx)	Fortement irritant pour les yeux et les voies aériennes supérieures. Asphyxiants à forte exposition entraînant la mort. Fatigue, sécheresse de la gorge, toux et irritation nasale. Les effets à long terme peuvent inclure une bronchite.	Produits libérés avec les polyacrylonitriles, les polyamides et les celluloses.
HAP	Les HAP sont des substances toxiques pour l'homme et des polluants environnementaux. On estime qu'ils peuvent être à l'origine de plusieurs millions de morts par an dans le monde. Le benzo(a)pyrène est un constituant commun et le plus étudié. Il est cancérigène envers plusieurs tissus, y compris la peau, les glandes mammaires et les voies respiratoires. Exemple d'HAP : acénaphthène, anthracène, benzo(a)pyrène, chrysène, fluoranthène, fluorène, naphthalène, pyrène...	Ils sont originaires de plusieurs sources telles que la combustion du charbon, les émissions de diesel, les produits domestiques, le chauffage, la cuisson et les incendies indésirables. L'EPA a identifié 16 HAP polluants prioritaires.
Les Phtalates	Un membre de cette classe le di-(2-éthylhexyl)phtalate (DEHP) est un irritant pour les muqueuses et les yeux et peut causer des nausées et des diarrhées. Il est classé comme agent cancérigène probable pour l'homme par l'EPA. D'autres possèdent un effet de perturbateur endocrinien et sont toxiques pour l'appareil reproducteur mâle chez le rongeur.	Produits à quelque 3 millions de tonnes par an dans le monde, les phtalates sont présents partout dans notre environnement quotidien : cosmétiques, peintures, jouets... Ils sont couramment utilisés comme plastifiants des matières plastiques (en particulier le PVC)
PM _{2.5} et PM ₁₀	Ces particules agissent différemment sur l'organisme humain. En plus des effets irritants, les particules peuvent passer dans le sang par l'intermédiaire des parois alvéolaires des poumons et transporter des composés toxiques absorbés à leur surface (métaux lourds, composés organiques...). La figure 4 représente les zones de dépôts de particules dans les voies respiratoires humaines.	Les particules fines prennent naissance au cours d'un changement d'état de la matière, soit par réaction chimique en phase gazeuse, soit par évaporation à haute température de solides liquéfiés. Elles sont toutes de dimension inférieure au micron.
Métaux lourds : mercure, cadmium, plomb...	Pour une toxicité aiguë, les effets peuvent être des irritations et une déficience du système hépatique. Pour une toxicité chronique, les effets peuvent être des maux de tête, des cas d'insomnie, de nervosité, d'irritabilité, de dépression, d'anxiété, de perte de libido ou d'encéphalopathie.	Sous l'effet de la température, les métaux lourds contenus dans les déchets se volatilisent. Ces composés volatils peuvent se retrouver tels quels dans les fumées, se décomposer sous l'action de la chaleur, ou se fixer à la surface des particules en suspension et des cendres volantes. (HCl, SO ₂ , H ₂ S...)
Composés Organiques Semi-Volatils et Volatils	Les effets des COV sont nombreux et variés : problèmes respiratoires, irritations nasales et oculaires. Certains ont également une influence sur les systèmes immunitaires, sanguins, hépatiques rénaux et cardiovasculaires. Certains sont cancérigènes, tératogènes ou mutagènes.	Les COV sont les produits d'une combustion incomplète et regroupent les diverses molécules organiques qui n'ont pas été totalement décomposées lors de la combustion. Les concentrations des composés organiques émises dépendent très étroitement des

dont benzène	Exemple de COV : acroléine, benzène, phénol, styrène, toluène, formaldéhyde...	conditions thermiques.
	Cancérogène et génotoxique, il provoque des troubles digestifs et neurologiques. Irritant en exposition cutanée, il peut entraîner la mort par inhalation entre 5 à 15 minutes d'exposition à 2%. Les effets d'une exposition chronique sont des hémopathies bénignes et malignes ainsi que des effets sur le système immunitaire.	
Isocyanates	L'inhalation d'isocyanates pour l'être humain peut entraîner une sensibilisation respiratoire. La haute réactivité chimique des isocyanates se reflète par leur toxicité car son exposition est l'une des causes les plus fréquentes d'asthme professionnel chez les travailleurs dans les pays développés.	Les isocyanates sont utilisés dans la fabrication de mousses flexibles en polyuréthane pour les meubles, l'isolation des bâtiments ainsi que des frigidaires et congélateurs. Les deux principaux produits sur le marché ont des isomères de di-isocyanate de toluène (TDI) et le di-isocyanate de toluène.
Amiante	De 400 à 500 fois moins épaisses qu'un cheveu, les fibres d'amiante sont invisibles dans les poussières de l'atmosphère. Inhalées, elles peuvent se déposer au fond des poumons et provoquer des maladies respiratoires graves : plaques pleurales, cancers des poumons et de la plèvre (mésothéliome), fibroses (ou asbestose) ... Certaines maladies peuvent survenir après de faibles expositions mais la répétition de l'exposition augmente la probabilité de tomber malade. Les effets sur la santé d'une exposition à l'amiante surviennent souvent plusieurs années après le début de l'exposition.	L'amiante a longtemps été considéré comme un matériau miracle, peu cher, et aux qualités exceptionnelles. Il a été utilisé massivement pendant plus de 130 ans. Ce sont plusieurs milliers de produits à utilisation industrielle ou domestique qui ont été fabriqués. On peut en trouver dans l'isolation thermique, dans des mortiers à base de plâtre, dans des éléments de façade, des plaques ondulées, des mousses d'isolation...
Composés bromés et iodés	Cancérogène et génotoxique, ils provoquent des troubles digestifs et neurologiques. Irritants en exposition cutanée, ils peuvent entraîner la mort par inhalation entre 5 à 15 minutes d'exposition à 2%. Les effets d'une exposition chronique sont des hémopathies bénignes et malignes ainsi que des effets sur le système immunitaire.	Le brome et l'iode qui peuvent être présents dans les matériaux se volatilisent à haute températures sous forme de Br ₂ et I ₂ .

Tableau n°3. Synthèse des produits chimiques dans les fumées et gaz d'incendie, leurs impacts sur la santé et leur origine

En orange les polluants retenus pour cette étude.

D. Analyse de l'activité des sapeurs-pompiers de Paris

Afin de pouvoir répondre à l'étape n°3 de l'EQRS sur l'évaluation de l'exposition, nous allons modéliser l'activité de la population des sapeurs-pompiers de Paris. Cette modélisation va permettre de déterminer la dose de polluant qui arrive au contact ou qui pénètre l'organisme de chaque personnel. Pour cela, nous utiliserons un centre de secours type, spécifique à la BSPP, associé à une analyse de découpage du temps passé sur intervention par grade et par fonction créée par J. Lanfranca et D. Charlier dans leurs mémoires respectifs [18] [19]. Ce modèle de centre de secours sera mis à jour avec les données 2016 et 2017 afin de perfectionner cette matrice et d'affiner le découpage avec une nouvelle méthode. Les données relatives à ce schéma viennent de l'activité opérationnelle de la BSPP via le Bureau Planification Opérationnelle (BPO) et le Bureau Organisation - Préparation Opérationnelle (BOPO) pour la caractérisation ainsi que le Bureau Organisation Ressources Humaines (BORH) pour la répartition des catégories de sapeurs-pompiers.

Les sapeurs-pompiers de compagnie d'incendie sont répartis en 6 catégories. Les données sont synthétisées dans le tableau n°4 ci-dessous :

Catégorie	Age moyen (en année)	Durée moyenne d'activité en CIS	Temps dans le grade (en mois)	Règles d'affectation RH par EP6*	Effectif total BSPP en CIS	Effectif moyen BSPP par CS type**
Officier CGI	30	4 ans	48	0	48	0.68
Sous-officier CGI	38	18 ans et 2 mois	89	1	254	3.58
Sous-officier non CGI	31	10 ans et 9 mois	30	1	488	6.87
Caporaux-chef	28	8 ans et 3 mois	16	1	920	12.96
Caporaux	27	6 ans et 11 mois	33	1	894	12.59
Sapeur dont conducteur	24	4 ans et 2 mois	50	3	2182	30.73

Tableau n°4. Données de répartition RH (*Engin-pompe 6 hommes **71 centre de secours)

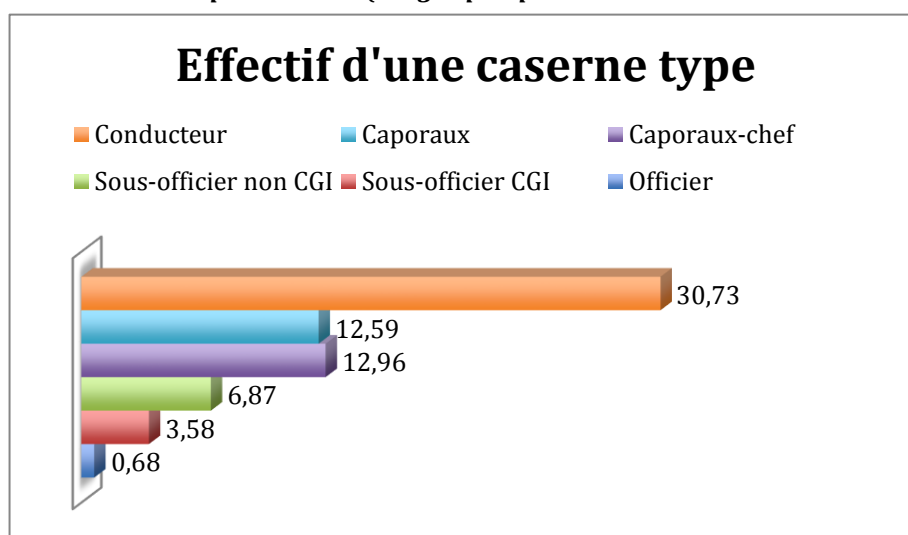


Figure 7. Effectif d'une caserne type

Concernant l'activité opérationnelle et donc l'exposition des sapeurs-pompiers par catégories, il convient de définir le nombre moyen d'intervention dans le tableau n°5.

Statistiques relatives aux temps passés (en min) par les engins-pompes sur feu de contenant « code motif 111 »

Année	2013	2014	2015	2016	2017	Moyenne
Moyenne du temps d'intervention (en min)	164	158	144	178	179	164.6

Tableau n°5. Durée des interventions pour feux de contenants

Pour le découpage temporel d'une intervention pour feu (tableau n°6), nous avons développé une matrice reprenant les horaires des opérations « code motif 111 » pour tous les feux de contenants. Afin de rendre la matrice la plus fine possible, nous nous sommes réunis à plusieurs des trois groupements d'incendie et de secours et nous avons relu 113 Mains Courantes Opérationnelles (MCO). La MCO rassemble toutes les informations liées à l'intervention : l'adresse exacte, la nature de l'intervention, les horaires de chaque engin ainsi que les durées de trajet, de présence sur site, les messages de renseignements successifs du COS... En exploitant l'ensemble des horaires, nous avons pu déterminer le pourcentage de chaque phase pour une intervention pour feu. Les tableaux n°6 et n°7 sont issus des feuilles de calculs Excel créées pour déterminer les statistiques de découpage. Sur les 113 MCO, nous en avons éliminé 23 car les phases actives et passives n'étaient pas assez distinctes.

Motif	Heure de présentation	Demande moyens	1er message de renseignement	Maitre du feu	Feu circonscrit	Feu éteint	Déblai et dégarnissage en cours	Déblai et dégarnissage terminés	Intervention ou reconnaissance terminées
Feu de ... Ou contigu à un contenant	04:15:00	04:19:00	04:24:00	06:32:00	05:42:00	07:04:00	07:04:00	19:07:00	19:30:00
Feu de ... Ou contigu à un contenant	14:58:00	15:10:00	15:15:00	16:05:00		16:37:00	16:37:00	20:05:00	20:05:00
Feu de ... Ou contigu à un contenant	00:15:00	00:17:00	00:21:00	02:07:00		03:47:00	05:17:00	18:49:00	18:49:00
Feu de ... Ou contigu à un contenant	16:03:00		16:26:00			16:26:00	16:26:00	16:41:00	16:41:00
Feu de ... Ou contigu à un contenant	15:06:00	15:09:00	15:13:00	17:18:00		17:56:00	17:56:00	21:48:00	21:48:00

Tableau n°6. Extrait du tableau statistique MCO (heures d'intervention)

Phase préparatoire	Phase active	Phase passive	Temps d'intervention total	Phase préparatoire %	Phase active %	Phase passive %
00:09:00	02:40:00	12:26:00	15:15:00	0,98	17,49	81,53
00:17:00	01:22:00	03:28:00	05:07:00	5,54	26,71	67,75
00:06:00	03:26:00	15:02:00	18:34:00	0,54	18,49	80,97
00:07:00	02:43:00	03:52:00	06:42:00	1,74	40,55	57,71
00:10:00	00:38:00	02:56:00	03:44:00	4,46	16,96	78,57

Tableau n°7. Extrait du tableau statistique MCO (% phases)

Découpage temporel d'une intervention pour feu « code motif 111 »

Phase	Type d'EP	Engin-pompe (en min et %)
Phase préparatoire		25.56 (15.53%)
Phase active		45.20 (27.46%)
Phase passive		93.84 (57.01%)
Temps d'intervention total		164.6
Phase trajet retour		16.78

Tableau n°8. Découpage temporel d'une intervention

Pour obtenir le temps de la phase trajet retour, nous avons calculé le temps moyen (du 1^{er} janvier 2015 au 1^{er} juin 2018) du trajet aller entre l'heure de départ de l'engin depuis la caserne et l'heure de présentation sur intervention au niveau de la BSPP. Nous avons obtenu le résultat de 8 minutes 40 secondes.

Dans un second temps, nous avons sélectionné aléatoirement 31 MCO pour comparer les temps d'aller d'un engin (avec les règles de circulation adaptées au caractère d'urgence) et le temps réel du trajet (en respectant les règles de conduite normale) grâce au logiciel Google Maps^a. Nous avons ainsi obtenu que nous mettions 93,65 % de temps en plus qu'en marche prioritaire pour se rendre sur l'intervention. A la BSPP, un engin-pompe met en moyenne 16 minutes et 47 secondes sur la phase trajet retour. Nous sommes proche du résultat rendu par le comité d'experts réuni par J. Lanfranca et D. Charlier, à savoir 16 minutes.

Nous avons choisi de partir du groupe de travail composé de 9 experts sapeurs-pompiers de Paris des mémoires de J. Lanfranca et D. Charlier pour quantifier temporellement les phases d'exposition. Avec leurs conclusions, nous avons pu croiser les résultats du tableau n°6 pour quantifier la durée de l'exposition aux fumées par inhalation hors port de l'ARI d'un engin-pompe CGI et non CGI lors d'une intervention « feu de contenants » dans les tableaux n°9 et n°10.

Quantification de la durée de l'exposition aux fumées par inhalation hors port de l'ARI d'un équipage engin-pompe CGI lors d'une intervention « feu de contenants » (en min et % du temps d'intervention)

Catégorie	Phase préparatoire	Phase active	Phase passive	Total intervention	Trajet retour
Chef de garde (off ou s.off)	26 (16%)	7 (4%)	30 (18%)	63 (38%)	16.78
Militaires du rang	0 (0%)	13 (8%)	53 (32%)	66 (40%)	16.78

Tableau n°9. Durée d'exposition hors port de l'ARI EP CGI

Quantification de la durée de l'exposition aux fumées par inhalation hors port de l'ARI d'un équipage engin-pompe non CGI lors d'une intervention « feu de contenants » (en min et % du temps d'intervention)

Catégorie	Phase préparatoire	Phase active	Phase passive	Total intervention	Trajet retour
Sous-officier	26 (16%)	18 (11%)	82 (50%)	126 (77%)	16.78
Militaires du rang	0 (0%)	3 (2%)	59 (36%)	62 (38%)	16.78

Tableau n°10. Durée d'exposition hors port de l'ARI EP non CGI

Affectation et activité opérationnelle par engin-pompe

Type d'engin-pompe	Total BSPP	Moyenne par CS	Moyenne annuelle du nombre d'intervention « feux de contenant » entre 2013 et 2017	Moyenne annuelle d'intervention « feux de contenants » par CS	Moyenne annuelle d'intervention « feux de contenant » par CS type	Durée moyenne annuelle d'intervention (en h) par CS type
EP CGI	73	1.03	5374	75.69	77.96	214
EP non CGI	41	0.58			43.90	120

Tableau n°11. Synthèse des données opérationnelles par catégories d'engin-pompe

Analyse de l'exposition annuelle

Afin de définir un modèle précis nécessaire pour la quantification de l'exposition temporelle du personnel en compagnie d'incendie à la BSPP, nous avons procédé au calcul du nombre de gardes prises par le personnel par catégorie et par an. Les officiers devant comptabiliser 120 gardes par an, il n'y a pas besoin de calcul pour cette catégorie qui n'entre pas en concurrence avec les autres. Les résultats sont exprimés dans le tableau n°12.

Résultats

Catégorie	Nombre de gardes dans les EP/an	Temps passé sur intervention (min/an)	Temps passé en phase post extinction passive (min/an)	Temps passé en phase post extinction passive sans ARI (min/an)	Temps passé trajet retour (min/an)
Officier CGI	120	4221	2406	769	430
Sous-officier CGI	EP CGI : 61.03	2147	1224	391	219
	EP : 34.72	685	391	342	70
	Total : 95.75	2832	1615	733	289
Sous-officier	32.48	641	365	320	66
Caporal-chef	EP CGI : 34	1196	682	385	122
	EP : 20.8	410	234	147	42
	Total : 54.8	1606	916	532	164
Caporal	EP CGI : 27.05	952	543	307	97
	EP : 16.59	327	186	118	33
	Total : 43.64	1279	729	425	130
Sapeur	EP CGI : 29.7	1045	596	336	106
	EP : 18.2	359	205	129	37
	Total : 47.9	1404	801	465	143

Tableau n°12. Analyse du temps annuel passé hors ARI du sapeur-pompier par grade sur incendie

E. Estimation des concentrations en polluants présents dans les fumées lors des différentes phases de l'incendie

Ces concentrations ont été estimées à partir de trois études réalisées par le laboratoire central de la préfecture de police et le Bataillon des Marins-Pompiers de Marseille (BMPM).

F. Protocoles d'essais sur la réalisation d'une attaque d'atténuation

L'attaque d'atténuation appelée également attaque de transition est une attaque limitée dans le temps, menée par l'extérieur du volume et destinée à réduire grandement la puissance du feu. Il s'agit de refroidir le volume et de modérer le sinistre avant toute intervention dans la pièce par le binôme d'attaque. L'effet recherché est d'une part une vaporisation en partie haute, et d'autre part une retombée en pluie sur les parties incandescentes : ce qui provoque un inertage sur les parties du foyer non atteintes par l'eau. Elle semble actuellement le meilleur moyen pour diminuer l'exposition du sapeur-pompier et le risque d'explosion et/ou de phénomènes thermiques. En ce sens, il convient d'étudier cette méthode pour en évaluer l'impact sanitaire.

1. Essais sur les limites d'emploi

Le mardi 21 et le jeudi 23 novembre 2017, nous avons effectué des essais sur la mise en œuvre de l'attaque d'atténuation sur le site d'Orly avec le matériel BSPP en collaboration avec le LCPP. Ces essais avaient pour but de répondre à la question suivante :

- Quelles sont les limites techniques de sa mise en œuvre (hauteur, direction...) ?

L'expérimentation sur l'attaque d'atténuation s'est déroulée de la façon suivante :

- plusieurs essais ont été réalisés à **1 mètre** de la façade du bâtiment pour atteindre respectivement le 1^{er} étage, le 2^{ème} étage et le 3^{ème} étage ;
- plusieurs essais ont été réalisés à **3 mètres** de la façade du bâtiment pour atteindre respectivement le 1^{er} étage, le 2^{ème} étage et le 3^{ème} étage ;
- plusieurs essais ont été réalisés à **5 mètres** de la façade du bâtiment pour atteindre respectivement le 1^{er} étage, le 2^{ème} étage, le 3^{ème} étage, le 4^{ème} étage et le 5^{ème} étage ;
- plusieurs essais ont été réalisés à **7 mètres** de la façade du bâtiment pour atteindre respectivement le 3^{ème} étage, le 4^{ème} étage et le 5^{ème} étage ;
- plusieurs essais ont été réalisés à **9 mètres** de la façade du bâtiment pour atteindre respectivement le 4^{ème} étage et le 5^{ème} étage ;
- plusieurs essais ont été réalisés à **11 mètres** de la façade du bâtiment pour atteindre le 5^{ème} étage.

Puis de façon à confirmer ces résultats, nous avons calculé à travers le théorème de Thalès par la configuration papillon la distance à adopter en fonction de la hauteur à atteindre. (*Annexe 1 et 2*)

2. Essais sur l'exposition des sapeurs-pompiers

Afin d'évaluer l'incidence d'un tel mode d'action sur incendie, il est important de réaliser des essais conjointement avec le LCPP pour déterminer son impact sanitaire à travers la mesure de concentration des polluants sur feux. Ces essais ont pour but de répondre à la question suivante : est-ce efficace pour limiter l'exposition par inhalation ?

Le plan d'expérimentation proposé se compose des étapes suivantes :

- Mesurer le temps d'exposition d'une attaque classique dite par l'intérieur contre l'incendie d'un appartement A jusqu'à la phase de déblai par deux sapeurs-pompiers ;
- Mesurer le temps d'exposition d'une attaque classique dite par l'intérieur contre l'incendie d'un appartement B précédé d'une attaque d'atténuation jusqu'à la phase de déblai par deux sapeurs-pompiers ;
- Mesurer le temps d'exposition d'une attaque classique dite par l'intérieur contre l'incendie d'un appartement C et précédé d'une attaque d'atténuation simultanément avec la

mise en place du Ventilateur Auxiliaire Relai (VAR) à la porte de l'appartement jusqu'à la phase de déblai par deux sapeurs-pompiers ;

- Mesurer la concentration des polluants dans le volume de l'appartement A ;
- Mesurer la concentration des polluants dans le volume de l'appartement B avec une attaque d'atténuation ;
- Mesurer la concentration des polluants dans le volume de l'appartement C avec une attaque d'atténuation et la mise en place du VAR.

Les appartements A, B et C devront être meublés à l'identique afin que les essais soient les plus représentatifs et reproductibles possibles. Chaque phase devra être renouvelée au minimum deux fois pour pouvoir comparer les données entre elles. Les résultats auront pour but d'évaluer le temps d'exposition et la concentration des polluants dans les fumées afin de déterminer quel est l'impact sanitaire pour les différents modes d'action. Grâce à ces résultats, nous pourrons élaborer des préconisations et de nouveaux outils pour les sapeurs-pompiers de Paris.

3. Analyse des données issues de la littérature

Une approche alternative pour évaluer l'impact de l'attaque d'atténuation sur les concentrations en polluants auxquelles les pompiers sont exposés est de se baser sur une analyse de la littérature. Pour cela, nous nous sommes appuyés sur les données des expérimentations de l'UL et le NIST. [7] Nous avons repris et analysé l'ensemble des courbes indiquant le pourcentage de volume de gaz avant et après les attaques d'atténuation.

IV. Résultats

A. Sélection des polluants retenus pour l'étude

Afin de sélectionner les polluants que l'on peut retrouver dans les fumées et gaz d'incendie, nous avons choisi de retenir plusieurs critères. Le tableau n°13 ci-après résume les différentes options afin de simplifier la démarche. La substance doit avant tout avoir la capacité d'induire un effet néfaste sur la santé chez les sapeurs-pompiers. La relation causale entre un ou plusieurs effets sur l'organisme et l'exposition à cette substance doit être établie. Il convient également de savoir si les informations toxicologiques sur les substances identifiées existent. Si oui, sont-elles pertinentes ? Conduisent-elles à des effets chroniques ? Il faut que les polluants retenus soient les plus représentatifs possibles et concernent différentes familles. Ce choix impose également que le LCPP puisse effectuer ces mesures avec ses équipements et que des études aient été menées en France sur la teneur en concentration des différents polluants lors d'incendie.

En prenant en compte l'ensemble de ces facteurs, les polluants retenus pour notre étude sont les PM₁₀, les PM_{2.5}, le benzène, le formaldéhyde et le monoxyde de carbone. Dès lors que nous ciblons la voie d'exposition par inhalation pour la caractérisation des risques et que toutes les voies doivent être considérées, alors nous pourrions aboutir à une sous-estimation du risque. D'une part, car la multiplication des voies d'exposition augmente le risque et d'autre part, car certains composés ont été exclus de notre étude sachant qu'ils peuvent présenter une toxicité par voie cutanée ou par ingestion. Le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) définit 4 groupes (de 1 à 4) correspondant à des degrés d'indication de cancérogénicité pour l'être humain. Le deuxième est subdivisé en groupe 2A et 2B. Ces groupes sont les suivants :

- Groupe 1 : agent cancérogène (parfois appelé cancérogène avéré ou certain) ;
- Groupe 2A : agent probablement cancérogène ;
- Groupe 2B : agent peut être cancérogène (parfois appelé cancérogène possible) ;
- Groupe 3 : agent inclassable quant à sa cancérogénicité ;
- Groupe 4 : agent probablement non cancérogène.

Parmi les polluants sélectionnés, le benzène et le formaldéhyde sont classés groupe 1.

Polluants Critères	Absorption	Effets néfastes sur la santé	Informations disponibles et pertinentes	Représentativité - Famille	Etudes en France sur la teneur du polluant sur feu	Mesures possibles par le LCPP	Références
Monoxyde de carbone (CO)	Inhalation	Aigu et chronique Non cancérigène	Suffisante chez l'homme et l'animal	Polluants atmosphériques	OUI	OUI	[26]
Dioxyde de carbone (CO₂)	Inhalation	Aigu et chronique Non cancérigène	Suffisante chez l'homme et l'animal	Polluants atmosphériques	NON	OUI	[27]
Acide cyanhydrique (HCN)	Inhalation, ingestion et cutanée	Aigu et chronique Non cancérigène	Non suffisante chez l'homme et l'animal	Acide	NON	OUI	
Ammoniac (NH₃)	Cutanée et inhalation	Aigu et chronique Non cancérigène	Suffisante chez l'homme et l'animal	Polluants atmosphériques	NON	NON	[28]
PM_{2.5} et PM₁₀	Inhalation	Aigu et chronique	OUI	Particules	OUI	OUI	[29]
Total HAP	Cutanée et inhalation	Chronique	OUI	HAP	NON	OUI	[29]
Formaldéhyde <i>Classé 1 (CIRC)</i>	Inhalation	Aigu et chronique Cancérigène	Suffisante chez l'homme et l'animal	COV	OUI	OUI	[29]
Mercure	Inhalation, ingestion et cutanée	Aigu et chronique CMR	Suffisante chez l'homme et l'animal	Métaux lourds	NON	NON	Anses
Toluène <i>Classé 3 (CIRC)</i>	Inhalation, ingestion et cutanée	Aigu et chronique Non cancérigène	Non suffisante chez l'homme et suffisante chez l'animal	COV	OUI	OUI	[30]
Benzène <i>Classé 1 (CIRC)</i>	Inhalation (20-80%), Cutanée (<1%)	Aigu et chronique CMR Leucémie	Suffisante chez l'homme et limitée chez l'animal	COV	OUI	OUI	[29]

Tableau n°13. Choix des polluants en fonction des critères retenus

En orange : Polluants retenus.

B. Choix des VTR

Une recherche de l'existence de la valeur toxicologique de référence pour chacune des substances sélectionnées a été réalisée. Cette première approche avait pour objectif de vérifier la disponibilité, dans les bases de données internationales ou nationales, de VTR permettant l'évaluation des risques sanitaires. Il existe une base de données canadienne (TERA) regroupant les VTR établies par des instances nationales ou internationales reconnues dans le domaine de l'EQRS à savoir : l'Agence for Toxic Substances and Disease Registry, le CIRC, l'International Toxicity Estimates for Risk, le Health Canada, l'US-EPA et l'Organisation Mondiale de la Santé. Le numéro d'enregistrement CAS de chaque composé chimique a été utilisé dans le moteur de recherche quand cela était possible afin d'interroger, sans risque d'erreur de traduction, la base de données à l'adresse Internet suivante : <http://www.tera.org/iter/>.

Nous avons également procédé à des recherches pour l'ensemble des polluants sélectionnés sur le site de l'INERIS : <https://substances.ineris.fr/fr/substance/>.

La description des effets toxiques, les modalités de dérivation des données scientifiques à la base de chaque VTR et les critères de sélection d'une VTR lorsque plusieurs existent, ont été recherchés dans une deuxième étape. L'étude se concentrant sur les effets causés par une exposition par voies respiratoires aux fumées, la sélection des VTR se fait au travers uniquement des VTR inhalation. Dans les cas où les critères seraient similaires, la valeur numérique la plus conservatoire pour la santé sera retenue.

Justification du choix des VTR

Nous avons retenu pour notre analyse et notre sélection des VTR les critères suivants : la notoriété de l'organisme qui la produit, sa mise à jour récente, la transparence dans la démarche de construction, son adéquation entre les durées et voies d'exposition et la préférence des données humaines sur les données animales. Le tableau n°14 résume ces critères pour justifier nos choix dans la sélection des VTR.

Pour les effets cancérogènes du benzène, l'effet concerné est l'apparition de leucémies. La valeur proposée par Health Canada est issue d'une étude non décrite et a donc été écartée. Les trois autres valeurs, proches, sont bien explicitées et issues de la même étude de cohorte professionnelle. Nous choisissons de garder la valeur de l'ANSES qui est une synthèse d'étude, qui est la plus récente et qui bénéficie d'un niveau de confiance fort. Pour les effets non cancérogènes, l'ATSDR propose un MRL de $9.7 \mu\text{g.m}^{-3}$ construite à partir de l'observation de 250 travailleurs exposés au benzène dans deux usines de chaussures à Tianjin en Chine. Cette valeur est la plus récente et la plus conservatoire, nous la garderons pour caractériser le risque. Pour les effets à court terme, nous sélectionnons la valeur qui bénéficie de données humaines et qui est la plus récente : $27 \mu\text{g.m}^{-3}$ de l'OEHHA.

Pour les particules fines PM_{2.5} et PM₁₀ [32], des études de cohortes américaines ont démontré une réduction de l'espérance de vie, corrélée à une augmentation du risque de développer des maladies chroniques cardiovasculaires, respiratoires et des cancers. L'AFSSET a effectué plusieurs constats quant à l'impact des particules en suspension sur la santé, notamment qu'aucun seuil n'ait été constaté en deçà duquel aucun effet sanitaire ne serait attendu. Il n'existe pas de VTR pour les particules, quelle que soit la fraction granulométrique prise en compte dans les bases de données de référence. L'OMS estime qu'en l'état actuel des connaissances, on ne peut établir de valeurs seuil de concentrations dans l'air ambiant en deçà desquelles l'ensemble de la population serait protégé des effets de la pollution particulaire sur la santé.

VOIE RESPIRATOIRE AVEC SEUIL (effet aigu)

N° CAS	Nom de la substance	VTR Aigue	Source	Date de la dernière version	Type d'étude	Facteurs d'incertitude et modèle de construction
630-08-0	Monoxyde de carbone (CO)	Valeurs guide 30 mg.m ⁻³ (1h)	OMS	2000	Homme	Modèle CFK LOEL = 2,5% de HbCO
		Valeurs guide 100 mg.m ⁻³ (15 min)	AFFSET	2007		
	PM 2.5	Valeurs guide 25 µg.m ⁻³	OMS	2005		
		100 µg.m ⁻³ (1h)	Health Canada	1987		
	PM 10	Valeurs guide 50 µg.m ⁻³	OMS	2005		
50-00-0	Formaldéhyde <i>Classé 1 (CIRC)</i>	MRLa 50 µg.m ⁻³	ATSDR	1999	Homme	LOEL = 500 µg.m ⁻³ UF = 10
		123 µg.m ⁻³	ANSES	2018	Homme	
		RELα : 55 µg.m ⁻³ (1h)	OEHHA	2008	Homme	BMC _{05L95} = 550 µg.m ⁻³ (ajustement 1h)
71-43-2	Benzène <i>Classé 1 (CIRC)</i>	REL : 27 µg.m ⁻³	OEHHA	2014	Homme	300
		MRLα = 0.009 ppm soit 29 µg.m ⁻³	ATSDR	2007	Souris	300

VOIE RESPIRATOIRE AVEC SEUIL (effet chronique)

N° CAS	Nom de la substance	VTR Chronique	Source	Date de la dernière version	Type d'étude	Facteurs d'incertitude et modèle de construction
630-08-0	Monoxyde de carbone (CO)	Valeurs guide 10 mg.m ⁻³ (8h)	OMS	2000	Homme	Modèle CFK- LOEL = 2,5% de HbCO
		VTVLEP 112 µg.m ⁻³	EPA	2009		
		23 mg.m ⁻³ (1h)	OEHHA	2003	Homme	LOEL = 1.1-3% de HbCO
	PM 2.5	Valeurs guide 10 µg.m ⁻³	OMS	2005		
		40 µg.m ⁻³	Health Canada	1987		
	PM 10	Valeurs guide 20 µg.m ⁻³	OMS	2005		
		20 µg.m ⁻³	FISIAQ (Finlande)	2000		
50-00-0	Formaldéhyde <i>Classé 1 (CIRC)</i>	9,84.10 ⁻³ µg.m ⁻³	ATSDR	1999	Homme	UF = 30 LOEL = 300 ug.m ⁻³
		3 µg.m ⁻³	OEHHA	1999	Homme	UF = 10 NOEL ajusté = 30 ug.m ⁻³
		9 µg.m ⁻³	OEHHA	2008	Homme	
71-43-2	Benzène <i>Classé 1 (CIRC)</i>	RfC : 3.10 ⁻² mg.m ⁻³	EPA	2003	Homme	300 UF _H = 10 UF _L = 3 UF _S = 3 UF _S = 3
		MRL = 0.003 ppm soit 9.7 µg.m ⁻³	ATSDR	2007	Homme	UF _H = 10 BMCL _(0,25sd) = 0,03 ppm
		REL = 60 µg.m ⁻³	OEHHA	2005	Homme	UF _H = 10 NOAEC = 0.19 ppm

VOIE RESPIRATOIRE SANS SEUIL						
N° CAS	Nom de la substance	ERU ($\mu\text{g.m}^{-3}$) ⁻¹	Source	Date de la dernière version	Type d'étude	Facteurs d'incertitude et modèle de construction
	PM 2.5	1.35.10 ⁻⁷	APHEIS	2007	Etude épidémiologique	RR + 30 ans extrapolés à tous âges
	PM 10	9,03.10 ⁻⁸	APHEIS	2007	Etude épidémiologique	
50-00-0	Formaldéhyde Classé 1 (CIRC)	1,3.10 ⁻⁵	EPA	1991	Homme / Rat	Modèle LMS
		2.10 ⁻¹⁰	Health Canada	2001	Rat	Modèle biologique de croissance clonale
		6.10 ⁻⁶	OEHHA	2005	Animal	Modèle LMS et MVK
71-43-2	Benzène Classé 1 (CIRC)	2,2.10 ⁻⁶ – 7,8.10 ⁻⁶	EPA	2003	Homme	Modèle linéaire aux faibles doses
		2,9.10 ⁻⁵	OEHHA	2005	Homme	Exposition cumulée moyenne des risques relatifs
		5.10 ⁻⁶	RIVM	2001	Homme	Extrapolation linéaire
		2,6.10 ⁻⁵	ANSES	2013		Synthèse d'études
		6.10 ⁻⁶	OMS	2000	Homme	Modèle linéaire aux faibles doses

Tableau n°14. Tableau sur les choix des VTR

En orange, les VTR retenues.

S'agissant des effets sanitaires des PM_{2.5} à long terme, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) considère que les vastes études épidémiologiques américaines (*American Cancer Society* et *Havard Six Cities* notamment) montrent des associations robustes entre les expositions à long terme aux PM_{2.5} par inhalation et la mortalité, quelle que soit la cause, cardiovasculaire ou par cancer du poumon. L'OMS s'appuie donc exclusivement sur ces résultats. Pour fixer la valeur guide à long terme des PM₁₀, l'OMS considère que le ratio PM₁₀/PM_{2.5} de 2 est recevable et utilisable pour extrapoler la valeur guide PM_{2.5}. Ce ratio est proche de ce qui est observé en moyenne dans l'air ambiant des zones urbaines dans les pays en voie de développement et il correspond à la fourchette haute de la gamme des ratios dans les zones urbaines des pays industrialisés. La valeur guide annuelle retenue en PM₁₀ dans l'air est donc égale à 20 $\mu\text{g.m}^{-3}$. Concernant les effets sanitaires à court terme, sur le même modèle, l'OMS préconise respectivement des valeurs guides de 25 $\mu\text{g.m}^{-3}$ pour les PM_{2.5} et de 50 $\mu\text{g.m}^{-3}$ pour les PM₁₀.

Il n'existe pas de VTR pour le monoxyde de carbone. En l'occurrence, l'OMS établit des valeurs guides pour la qualité d'air, mais nous choisirons de garder la valeur toxicologique VTVLEP fournie par l'US EPA : 112 $\mu\text{g.m}^{-3}$. Aucune étude n'a pu établir des seuils pour des effets cancérogènes avec le monoxyde de carbone. En revanche, l'OMS établit deux valeurs guides pour les effets aigus par inhalation : 30 mg.m^{-3} pour une heure et 100 mg.m^{-3} pour 15 minutes. Nous avons choisi de garder la valeur pour une heure car l'étude se concentre sur la phase passive de l'intervention pour un sapeur-pompier (qui correspond en moyenne à une heure) et la valeur de 15 minutes se rapproche beaucoup plus de la phase active.

Pour le formaldéhyde et le choix sur les effets cancérogènes, trois valeurs sont disponibles et concernent des cancers différents : épidermoïde pour US-EPA et voies respiratoires d'une manière générale pour l'OEHHA. La valeur proposée par l'OEHHA de 1999 ne peut être extrapolée à des niveaux d'exposition en dehors de la plage utilisée pour l'étude (modèle non linéaire). Bénéficiant toutes de données humaines, nous avons choisi de retenir la VTR la plus

récente : 9 $\mu\text{g.m}^{-3}$. Pour les effets non cancérogènes, deux valeurs sont disponibles. Nous avons retenu la valeur la plus protectrice. Concernant les effets aigus, l'OEHHA propose une VTR pour une exposition d'une heure, provenant de l'analyse de données humaines contrôlées chez des sujets sains et non-fumeurs sur la base d'une irritation ressentie : 55 $\mu\text{g.m}^{-3}$.

C. Evaluation des expositions

L'estimation de l'exposition des sapeurs-pompiers de Paris implique de déterminer la dose de polluants qui arrive au contact ou qui pénètre dans l'organisme. Par la sélection des polluants et des effets qu'ils engendrent, nous avons choisi de garder uniquement la voie d'inhalation pour cette évaluation. Les paramètres clés de cette détermination sont la fréquence, la durée et l'intensité des contacts entre les sapeurs-pompiers et la substance.

Dans une première partie, nous analyserons les données d'analyse d'activité présentées dans les tableaux de la partie III. D. *Tableau d'exposition* afin de caractériser le temps de contact de l'organisme avec les polluants à partir des informations de fréquence et de durée. Dans une deuxième partie, nous synthétiserons les résultats des études menées pour évaluer la concentration des polluants dans l'environnement. Enfin, la troisième partie permettra de combiner ces résultats pour aboutir à une évaluation du niveau moyen d'exposition (concentration moyenne inhalée ou CMI) pour chaque grade de sapeur-pompier et chaque polluant considéré.

1. Analyse de la fréquence et de la durée d'exposition vie entière

Pour l'évaluation de l'exposition vie entière par voie d'inhalation entre les substances et l'organisme pendant les phases post-extinction et lors des trajets retour, le tableau n°15 regroupe les données issues de la modélisation de l'activité. Cette modélisation intègre, pour une fonction donnée, l'exposition de la personne sur toute sa durée de carrière. Cette exposition est la sommation des expositions de l'ensemble des fonctions occupées antérieurement.

Tableau n°15. Quantification du temps d'exposition vie entière par catégorie

Catégorie	Officier CGI	Sous- officier CGI	Sous-officier non CGI	Caporaux- chef	Caporaux	Sapeurs
Ancienneté moyenne en compagnie d'incendie	4 ans	18 ans et 2 mois	10 ans et 9 mois	8 ans et 3 mois	6 ans et 11 mois	4 ans et 2 mois
Ancienneté dans le grade	48 mois	89 mois	30 mois	16 mois	33 mois	50 mois
Durée en phase post extinction sans ARI par catégorie par an	769 min	733 min	320 min	532 min	425 min	465 min
Durée en phase post extinction sans ARI par catégorie pour vie entière	3076 min	5436 min	800 min	710 min	1169 min	1938 min
Durée en phase post extinction sans ARI pour vie entière	3076 min (2.14j)	10053 min (6.99j)	4617 min (3.21j)	3817 min (2.65j)	3107 min (2.16j)	1938 min (1.35j)
Durée trajet retour par catégorie par an	430 min	289 min	66 min	164 min	130 min	143 min
Durée trajet retour par catégorie vie entière	1720 min	2143 min	165 min	219 min	357 min	596 min
Durée trajet retour vie entière	1720 min (1.19j)	3480 min (2.42j)	1337 min (0.93j)	1172 min (0.81j)	953 min (0.66j)	596 min (0.41j)

2. Synthèse des concentrations des polluants dans l'atmosphère

Pour réaliser une synthèse des concentrations des substances dans l'air sur les feux de contenants, dans la phase passive et sur le retour d'intervention, nous allons calculer la teneur des polluants en fonction de trois études. Nous avons sélectionné ces études car elles sont menées par le laboratoire central de la préfecture de police et le Bataillon des Marins-Pompiers de Marseille sur le territoire et se rapprochent au plus près des conditions d'exposition étudiées.

Nous allons utiliser ces valeurs pour caractériser une probabilité d'excès de risque sur les phases où les sapeurs-pompiers ne portent pas leur ARI.

a) *Rapport sur l'évaluation de l'exposition des professionnels aux polluants de l'air sur des scènes d'incendie par le LCPP [33]*

Après les pompiers, les enquêteurs de la permanence générale du Laboratoire Central de la Préfecture de Police sont les professionnels les plus exposés aux fumées d'incendie : ils interviennent juste après l'extinction du feu pour en déterminer les causes, et sont exposés tout le temps de l'enquête à des polluants particuliers. Cette étude a pour but de déterminer à quels polluants et à quels niveaux de concentrations sont soumis les enquêteurs du Laboratoire Central lors de leurs interventions post-incendie.

Des prélèvements actifs d'air ont été effectués pendant les interventions des enquêteurs Recherches, Circonstances et Causes des Incendies (RCCI), à l'aide de pompes et supports de prélèvements spécifiques aux polluants recherchés. 23 interventions ont fait l'objet de prélèvements d'air. Toutes les mesures pour le Benzo(a)pyrène sont en dessous de la Limite de Quantification (LQ).

Polluants	Nombre de mesures	Maximum observé	Moyenne observée	Médiane observée
Monoxyde de carbone	21	14 ppm soit 17.5 mg.m ⁻³	4 ppm soit 5 mg.m ⁻³	/
Benzène	23	0.24 mg.m ⁻³	0.045 mg.m ⁻³	0.038 mg.m ⁻³
Formaldéhyde	15	0.16 mg.m ⁻³	0.034 mg.m ⁻³	0.019 mg.m ⁻³
Benzo(a)pyrène	23	< à la LQ	< à la LQ	< à la LQ
PM₁₀	21	0.71 mg.m ⁻³	0.251 mg.m ⁻³	0.217 mg.m ⁻³
PM_{2.5}	16	0.49 mg.m ⁻³	0.165 mg.m ⁻³	0.142 mg.m ⁻³

Tableau n°16. Récapitulatif des valeurs des polluants pour la phase de déblai

b) *Rapport sur l'évaluation du risque chimique professionnel lors des manœuvres de noyage et de déblai par le BMPM [34]*

Cette étude est l'évaluation la plus précise qui existe sur la teneur en polluant des feux de contenant post-extinction. De 1996 à 2001, l'équipe du laboratoire mobile de spectrométrie de masse du Bataillon de Marins-Pompiers de Marseille est intervenue sur 367 feux urbains. Des prélèvements d'atmosphère ont été réalisés lors des opérations de noyage et de déblai. Dans un premier temps, sur 285 interventions, une étude qualitative par spectrométrie de masse couplée à une chromatographie en phase gazeuse a été menée afin de déterminer les composés organiques les plus fréquemment rencontrés.

Après cette détermination et la mise en place d'un protocole d'étalonnage, selon la norme AFNOR EN 482 et les recommandations de l'Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS), une quantification des 13 composés organiques semi-volatils les plus fréquemment rencontrés a alors été effectuée sur 82 déblais. En outre, sur 50 de ces 82 échantillons, un dosage de gaz dits «

permanents » (CO, NO₂, HCN et SO₂) a été effectué par des détecteurs électrochimiques.

Polluants	Nombre de mesures	Maximum observé	Valeur médiane
Monoxyde de carbone	50	265 ppm soit 331.25 mg.m ⁻³	37.5 ppm soit 46.87 mg.m ⁻³
Benzène	82	16.30 mg.m ⁻³	0.95 mg.m ⁻³

Tableau n°17. Récapitulatif des valeurs maximales et médianes des polluants pour le BMPM

c) Rapport sur l'évaluation de l'impact de la contamination par les fumées d'incendie des EPI des sapeurs-pompiers de Paris sur la qualité de l'air de leur environnement de travail par le LCPP [35]

La troisième étude concerne une évaluation de la contamination des EPI qui a été effectuée sur le site du fort de la Briche à Saint-Denis (93). À ce titre, une campagne d'essais, avec une répétabilité acceptable de brûlages en caisson d'entraînement aménagé à partir d'un conteneur maritime de 40 pieds, a été mise en œuvre par la BSPP afin de recréer les conditions réelles d'une exposition au feu. Nous garderons les valeurs de l'essai numéro 3 sur l'évaluation du niveau de pollution de l'air intérieur des cabines d'engins-pompes après intervention sur un incendie. A l'issue d'un brûlage de type « incendie d'appartement » dans le caisson d'entraînement, les tenues de feu, les ARI et le matériel d'intervention souillés après les opérations d'extinction et de déblais de 5 sapeurs-pompiers ont été entreposés dans la cabine d'un engin pompe. Cette cabine a été instrumentée afin de mesurer les niveaux de concentration de différents polluants susceptibles d'être émis par les tenues et le matériel après avoir été souillés par les fumées d'incendie. Les mesures ont été effectuées sur une période d'environ 2 heures. Grâce à ces mesures, nous pouvons calculer le risque lors du retour d'intervention des sapeurs-pompiers dans les engins-pompes.

Polluants	Période de mesures	Maximum observé	Moyenne
Benzène	2 heures	/	30 µg.m ⁻³
Toluène	2 heures	/	160 µg.m ⁻³
Formaldéhyde	2 heures	/	32 µg.m ⁻³
PM₁₀	2 heures	1470 µg.m ⁻³	63 µg.m ⁻³
PM_{2.5}	2 heures	246 µg.m ⁻³	24 µg.m ⁻³

Tableau n°18. Récapitulatif des valeurs des polluants pour la phase de retour d'intervention

3. Calcul des concentrations moyennes inhalées

Nous avons gardé les valeurs médianes pour les effets chroniques et les valeurs maximales pour les effets aigus. Nous sélectionnerons volontairement les valeurs médianes et maximales de l'étude du BMPM pour le benzène et le monoxyde de carbone car elle présente une puissance statistique nettement supérieure avec le suivi de 367 feux urbains entre 1996 et 2001. Les valeurs retenues sont surlignées en orange.

D. Caractérisation des risques

La caractérisation des risques va permettre de synthétiser les 3 étapes précédentes pour fournir au décideur les éléments scientifiques dont il a besoin pour gérer le risque. S'agissant des effets survenant à partir d'un seuil, le résultat est exprimé sous forme d'un Quotient de Danger (QD). Pour les effets sans seuil, quelle que soit la dose, le résultat est un Excès de Risque Individuel (ERI) ou Collectif (ERC).

Actuellement, on considère par convention que les résultats qui peuvent déclencher une action de santé publique, par exemple la mise en place de mesures correctives, de surveillance ou de prise en charge médicale des populations, sont :

1. Un quotient de danger supérieur à 1 (l'exposition est supérieure à la VTR) ;
2. Un excès de risque individuel supérieur à 10^{-5} pour une vie entière, repère classiquement utilisé par de nombreuses instances nationales et internationales (OMS, FDA...) pour fixer des normes ou des valeurs guides dans le domaine environnemental. [36] Ce seuil de 10^{-5} ne bénéficie cependant d'aucune base législative en France ou en Europe, cette dernière refusant de définir un seuil de risque, car même minime, aucun risque ne doit être acceptable. Les Etats-Unis ont de leur côté imposé à travers leur législation fédérale, la valeur de 10^{-4} comme seuil de déclenchement d'action.

Nous avons effectué tous les calculs nécessaires avec le logiciel de calcul Excel. Dans cette partie, nous avons fait le choix de ne présenter que les résultats importants, significatifs et directement liés à la problématique.

1. Caractérisation des risques pour les effets avec seuil

a) Principe de calcul du QD

Le quotient de danger détermine un résultat qualitatif car il n'exprime pas une probabilité de survenue. Il permet de situer le niveau d'exposition par rapport à la VTR. Le niveau d'exposition est « x » fois supérieur ou inférieur à la VTR choisie.

$$QD = CI/VTR$$

b) Résultats pour les effets aigus

Le tableau n°19 présente les principaux résultats obtenus pour les effets à seuils aigus.

Substances	VTR ($\mu\text{g.m}^{-3}$)	Concentration ($\mu\text{g.m}^{-3}$)	Grade	Phase de l'intervention	QD = CMAI / VTR
Benzène	2,70E+01	1,63E+04	Officiers, sous-officiers CGI, sous-officiers et MDR	Post-incendie	6,04E+02
CO	3,00E+04	3,31E+05		Post-incendie	1,10E+01
Formaldéhyde	5,50E+01	1,60E+02		Post-incendie	2,91E+00
PM 10	5,00E+01	7,10E+02		Post-incendie	1,42E+01
	5,00E+01	1,47E+03		Retour d'intervention	2,94E+01
PM 2.5	2,50E+01	4,90E+02		Post-incendie	1,96E+01
	2,50E+01	2,46E+02		Retour d'intervention	9,84E+00

Tableau n°19. Résultats de la caractérisation du risque pour les effets aigus avec seuil

D'une part, le benzène est la substance la plus préoccupante avec le QD le plus élevé (soit un niveau d'exposition plus de 600 fois supérieur à la VTR). Les premiers signes d'intoxication sont une excitation puis des troubles de la parole, des céphalées, des vertiges, des insomnies et des nausées. (Lauwerys, 1999)

D'autre part, l'exposition aux PM_{2.5} et PM₁₀ augmente de manière significative le risque de développer des effets sanitaires indésirables lors des phases passives sans ARI comme lors du retour d'intervention, avec là encore un QD très élevé (de 10 à près de 30). Les premiers effets

associés à une intoxication aigue sont majoritairement cardio-vasculaires (infarctus du myocarde, altération du rythme cardiaque...) et respiratoires (exacerbé rations de l'asthme et des bronchites...). (Franchini et Mannucci, 2007)

Avec un QD supérieur à 10, le monoxyde de carbone est une substance présentant un risque significatif dont les effets principaux d'une intoxication aiguë sont des nausées, vomissements, céphalées, une asthénie, des vertiges ainsi que des troubles de l'humeur (angoisse, agitation) et comportementaux (syndrome confusionnel). Dans les suites d'une intoxication aigue, on observe un état pseudo-démientiel (aphasie, apraxie, agnosie) qui peut survenir après une période de rémission de durée variable (7 à 21 jours). L'importance des séquelles semble être en rapport avec la gravité et la durée d'intoxication, ce qui souligne l'importance d'un traitement rapide et approprié.

Enfin, le formaldéhyde est une substance également préoccupante. Ses effets à court terme sont des irritations aux yeux, du nez et de la gorge accompagnée de larmoiements et d'une sécheresse buccale.

c) Résultats pour les effets à long terme

Le tableau n°20 présente les principaux résultats obtenus pour les effets à seuil à long terme.

Nous retrouvons ici également les particules, le formaldéhyde et le benzène avec un quotient de danger supérieur à 1 pour les phases post-incendie et retour d'intervention. A cela s'ajoute le monoxyde de carbone qui avec le QD le plus important (>400) reste la substance la plus préoccupante lors des phases de déblai.

Les effets chroniques d'une exposition au formaldéhyde sont similaires à ceux observés lors d'une exposition aigue. Il est à noter qu'il existe une variabilité importante entre les niveaux de réponse des individus, d'une étude à l'autre, et d'un individu à l'autre.

Substances	VTR (µg.m ⁻³)	Concentration (µg.m ⁻³)	Grade	Phase de l'intervention	QD = CMAI / VTR
Benzène	9,70E+00	9,50E+02	Officiers, sous-officiers CG, sous-officiers et MDR	Post-incendie	9,79E+01
	9,70E+00	3,00E+01		Retour d'intervention	3,09E+00
CO	1,12E+02	4,69E+04		Post-incendie	4,18E+02
Formaldéhyde	9,00E+00	1,90E+01		Post-incendie	2,11E+00
	9,00E+00	3,20E+01		Retour d'intervention	3,56E+00
PM 10	2,00E+01	2,17E+02		Post-incendie	1,09E+01
	2,00E+01	6,30E+01		Retour d'intervention	3,15E+00
PM 2.5	1,00E+01	1,42E+02		Post-incendie	1,42E+01
	1,00E+01	2,40E+01		Retour d'intervention	2,40E+00

Tableau n°20. Résultats de la caractérisation du risque pour les effets chroniques avec seuil

Bien que le monoxyde de carbone soit considéré comme dénué d'effet toxique cumulatif sur le long terme, une action toxique à long terme sur le système cardio-vasculaire et neurologique ne peut être exclue. Il n'existe pas de donnée disponible sur l'existence d'effets chroniques suite à une exposition de longue durée à des niveaux engendrant des taux d'HbCO inférieurs à la valeur de 2,5%, considéré par la plupart des auteurs comme ne devant pas être dépassé pour se préserver d'effets sur la santé. Avec le QD le plus important et selon les résultats d'une étude de

suivi pendant 3 à 10 ans de patients après intoxication modérée à sévère au CO (perte de conscience, coma), l'ensemble d'effets cardio-vasculaires observés peuvent être associé à une augmentation de la mortalité à moyen/long terme. (Henry et al. 2006)

Concernant les particules $PM_{2.5}$ et PM_{10} , le QD clairement supérieur à 1 semble démontrer une forte probabilité que l'exposition à cette substance induise des effets délétères. Les études sur les effets sanitaires de l'exposition chronique aux particules sont plus rares que les études concernant les liens à court terme, elles sont principalement américaines. De façon générale, les expositions, dont la durée peut varier entre 1 an et 16 à 20 ans, ont été associées à des augmentations de la mortalité, aux symptômes de maladies respiratoires, à des diminutions de la fonction pulmonaire et à une augmentation des cas de cancer du poumon dans les études de cohortes transversales et prospectives. (Pope et Dockery, 2006)

Pour le benzène, de nombreuses études ont mis en évidence des effets hémotoxiques et immunotoxiques. L'atteinte de la moëlle osseuse est un des tout premiers signes de la toxicité chronique du benzène. Avec un QD supérieur à 1, les effets chroniques attendus sont une irritabilité, une diminution des capacités d'attention et de mémorisation, un syndrome dépressif et des troubles du sommeil.

2. Caractérisation des risques pour les effets sans seuil

a) Principes du calcul de l'ERI et de l'ERC

L'excès de risque représente la probabilité de survenue d'une pathologie pour les individus exposés, compte tenu du scénario construit. On parle d'excès de risque car cette probabilité est liée à l'exposition au polluant considéré et s'ajoute au risque de base présent dans la population.

$$ERI = CI \times ERU \times TE/TP$$

CI : concentration moyenne inhalée avec $CI = \frac{\sum Ci \times ti}{T}$

TE : temps d'exposition en années et TP : temps d'exposition vie entière (70 ans)

Ci = concentration de polluant dans l'air inhalé pendant une fraction de temps i (en mg/m^3)

ti = durée d'exposition à la concentration Ci sur la période d'exposition

T = durée de la période d'exposition (en même unité que ti)

Nous calculerons ensuite un Excès de Risque Collectif (ERC) comme suit :

$$ERC = ERI \times \text{nombre de pompiers concernés}$$

b) Excès de risque individuels

Le tableau n°21 présente les principaux résultats obtenus pour les effets sans seuil. Le seuil de 1.10^{-5} est dépassé pour le benzène dans la population des sous-officiers CGI avec un ERI de $1.16.10^{-4}$. Ce résultat pourrait représenter un point majeur dans l'exposition des pompiers car cette population est la plus ancienne dans la fonction avec une durée moyenne de 18 ans et 2 mois de service.

Substances	ERU ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) ⁻¹	Concentration ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) ⁻¹	Grade	Phase de l'intervention	TE (en min)	TP (en min)	ERI	TOTAL
Benzène	2,60E-05	1,63E+04	Sous-officiers	Post-incendie	10053	36792000	1,16E-04	
	2,60E-05	3,00E+01	CGI	Retour d'intervention	3480	36792000	7,38E-08	1,16E-04
	2,60E-05	1,63E+04	Sous-officiers	Post-incendie	4617	36792000	5,32E-05	
	2,60E-05	3,00E+01		Retour d'intervention	1337	36792000	2,83E-08	5,32E-05
	2,60E-05	1,63E+04	Caporaux-chef	Post-incendie	3817	36792000	4,40E-05	
	2,60E-05	3,00E+01		Retour d'intervention	1172	36792000	2,48E-08	4,40E-05

Tableau n°21. Résultats de la caractérisation du risque pour les effets sans seuil

Plus de 25 études ont rapporté une augmentation des taux de cancer à la suite d'expositions du benzène dans le cadre professionnel. Le benzène est classé 1 par le CIRC depuis 1987. De nombreuses études montrent également qu'il entraîne chez l'homme, après une exposition chronique, des aberrations chromosomiques (*Zhang et al. 1999*) ainsi que des mutations. Les études épidémiologiques ont clairement mis en évidence une relation causale entre l'exposition au benzène en milieu professionnel et l'apparition de leucémies aigües non lymphocytaires (*Rinsky et al. 2002*). Le mécanisme d'action cancérigène du benzène est lié à ses effets génotoxiques.

c) Excès de risque collectif

L'US-EPA considère que tous les excès de risque de cancer peuvent être associés entre eux, quand bien même les organes cibles diffèrent, dans le but d'apprécier globalement le risque cancérigène qui pèse sur la population exposée. Dans le tableau n°22, nous avons donc calculé un ERI cumulé tous polluants confondus pour chaque grade de sapeur-pompier lié à l'exposition sur intervention lors des phases post-incendie sans ARI et du retour de l'opération. L'ERI moyen chez les sapeurs-pompiers est $3,7 \cdot 10^{-5}$.

Grade	ERI Cumulé tout polluant	ERC par catégorie	ERC BSPP
Officiers CGI (effectif = 48)	3,57E-05	1,71E-03	1,79E-01
Sous-officiers CGI (effectif = 254)	1,16E-04	2,95E-02	
Sous-officiers (effectif = 488)	5,35E-05	2,61E-02	
Caporaux-chef (effectif = 920)	4,42E-05	4,07E-02	
Caporaux (effectif = 894)	3,60E-05	3,22E-02	
Sapeurs (effectif = 2182)	2,25E-05	4,90E-02	

Tableau n°22. Résultats des ERI cumulés et ERC tout polluant

Il est important de répéter que le seuil fixé ici de $1 \cdot 10^{-5}$ ne bénéficie d'aucune base législative en France ou en Europe, cette dernière refusant de définir un risque, car même minime, aucun risque ne doit être acceptable. Les Etats-Unis ont de leur côté imposé à travers leur législation fédérale, la valeur de $1 \cdot 10^{-4}$ comme seuil de déclenchement d'action immédiate.

Afin de traduire ces résultats au niveau populationnel, nous avons calculé un ERC pour les 4786 sapeurs-pompiers de Paris en service d'incendie et de secours exposés, par grade ainsi que tous grades confondus. Ces ERC sont présentés dans le tableau n°22. Le nombre total de cas de cancer en excès dans la population de sapeurs-pompiers de Paris attribuables à l'exposition par inhalation lors des phases passives et de transport à l'ensemble des composés cancérigènes retenus dans la quantification du risque pouvant survenir au cours de la vie est de 0,18 sur

l'ensemble des 4 786 sapeurs-pompiers. Ce chiffre peut être interprété comme étant le nombre de cancer pouvant être évités à la brigade. Pour cela, il faut mettre en place des procédures rapides et simples afin de modifier l'organisation au sein des secours. Ces préconisations doivent pouvoir être utilisées par l'ensemble des services d'incendie et de secours de la métropole.

E. Impact sanitaire d'une attaque d'atténuation

1. Résultats sur la mise en œuvre

Nous avons pu déterminer dans le tableau n°23 les distances entre le porte-lance et la façade du bâtiment en fonction de l'étage concerné :

Niveau	Calcul bâtiment Haussmannien	Calcul bâtiment 4 ^{ème} famille	Résultat sur le site d'Orly
1 ^{er} étage	3.75 mètres	3.62 mètres	5 mètres
2 ^{ème} étage	6.56 mètres	6.26 mètres	5 mètres
3 ^{ème} étage	9.37 mètres	8.91 mètres	7 mètres
4 ^{ème} étage	12.19 mètres	11.56 mètres	9 mètres
5 ^{ème} étage	15 mètres	14.20 mètres	11 mètres

Tableau n°23. Résultats des limites d'emploi de l'attaque d'atténuation

De façon à opérer de la manière la plus simple et pragmatique possible, nous avons proposé que la règle suivante soit appliquée lorsque le porte-lance doit effectuer une attaque d'atténuation :

- Prendre une distance de 3 mètres par étage avec 6 mètres minimum.

Il faut avoir une pression de 6 bars à la lance pour une attaque optimale. Ces distances sont forcément adaptées en fonction des configurations de l'intervention. Ces essais n'ont pas pu répondre aux questions suivantes :

- Quelle est l'influence du vent ?
- Peut-on utiliser cette attaque au moyen de l'échelle aérienne ?
- Si oui, à quel étage l'échelle aérienne doit-elle se positionner sous le niveau du feu ?

Il est à noter qu'au-delà du 5^{ème} étage, le jet de la lance ne permet plus d'atteindre correctement les étages.

2. Impact sur les concentrations lors d'un incendie

Les essais initialement prévus n'ont pu être réalisés pour le moment. Dès lors et de façon à motiver la réalisation d'une telle étude, nous allons présenter les résultats de l'impact sanitaire d'une attaque d'atténuation sur la concentration des fumées et gaz d'incendie grâce aux données des expérimentations de l'UL et le NIST. [7]

Nous avons repris l'ensemble des données sur les courbes indiquant le pourcentage de volume de gaz dans les différents scénarios pour chaque attaque d'atténuation à l'aide du logiciel « WebPlotDigitizer ». La figure n°7 représente l'évolution des volumes des gaz CO₂ et CO lors d'un feu de sous-sol (pour exemple). Puis nous avons calculé sur l'ensemble des données la moyenne entre le volume de gaz avant et après l'attaque d'atténuation pour chaque essai et chaque courbe disponible. Nous avons pu conclure que lors d'un feu de contenant et lorsque le mode d'extinction utilisée est l'attaque d'atténuation, le volume de gaz présent dans l'environnement baisse en moyenne de 33,10% comparé à une attaque classique.

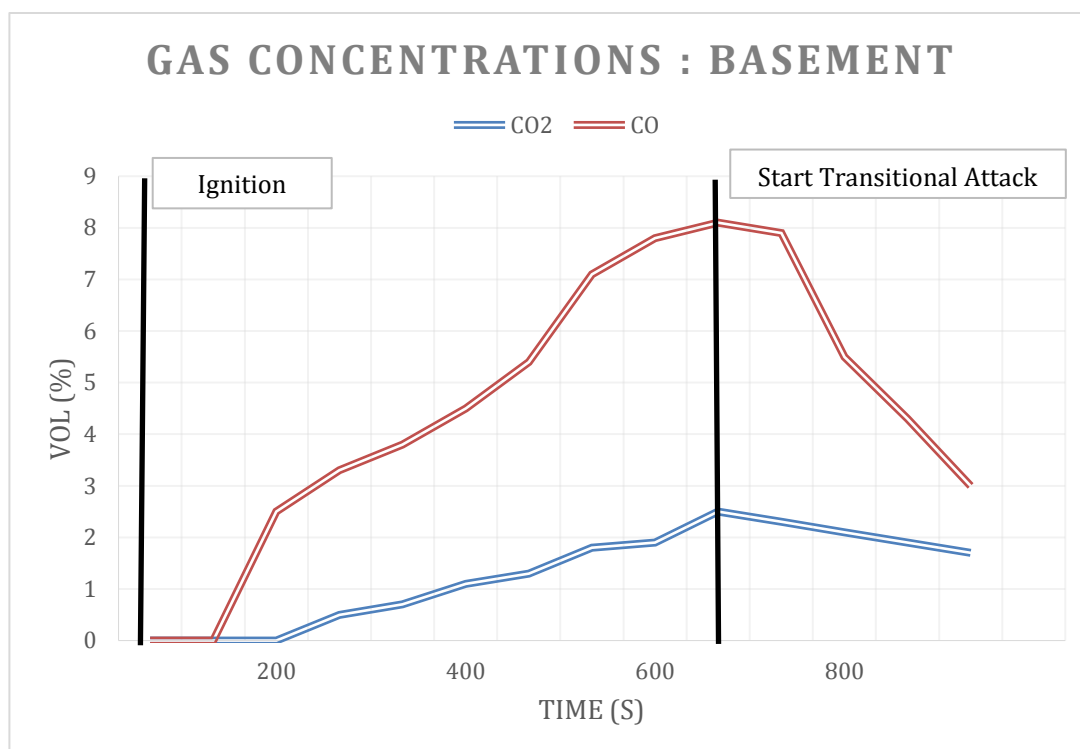


Figure 8. Volume de gaz lors d'un feu de sous-sol avec une attaque d'atténuation

Afin d'estimer les concentrations médianes et maximales en polluants attendus après une attaque d'atténuation, nous avons appliqué le taux de réduction estimé de 33% aux concentrations observées sans attaque d'atténuation qui étaient présentés dans les tableaux n°16 et n°17 pages 39 et 40 de cette étude. Le tableau n°24 présente ces concentrations estimées.

Polluants	Maximum estimé	Médiane estimée
Monoxyde de carbone	221.61 mg.m ⁻³	31.36 mg.m ⁻³
Benzène	10.90 mg.m ⁻³	0.64 mg.m ⁻³
Formaldéhyde	0.107 mg.m ⁻³	0.013 mg.m ⁻³
PM₁₀	0.475 mg.m ⁻³	0.145 mg.m ⁻³
PM_{2.5}	0.328 mg.m ⁻³	0.095 mg.m ⁻³

Tableau n°24. Concentrations de polluants estimées après une attaque d'atténuation

3. Impact sur les risques sanitaires

Les risques sanitaires associés à l'exposition aux polluants présents dans les fumées dans l'hypothèse d'une attaque d'atténuation ont été caractérisés suivant la même méthodologie que précédemment, en utilisant les concentrations maximales.

Le tableau n°25 compare les résultats obtenus pour le benzène entre le scénario 1 (sans attaque d'atténuation) et le scénario 2 (avec attaque d'atténuation), en termes de risque de cancer (effets sans seuil). On constate une baisse significative de l'ERI, notamment pour la population des sous-officiers CGI qui est la plus exposé. L'excès de risque individuel passe de $1,16.10^{-4}$ à $7,75.10^{-5}$.

	Scénario 1	Scénario 2			Scénario 1	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 2
Substances	Concentration (µg.m ⁻³) ⁻¹	Concentration (µg.m ⁻³) ⁻¹	Grade	Phase de l'intervention	ERI	TOTAL	ERI	TOTAL
Benzène	1,63E+04	1,09E+04	Sous-officiers CGI	Post-incendie	1,16E-04		7,74E-05	
	3,00E+01	3,00E+01		Retour d'intervention	7,38E-08	1,16E-04	7,38E-08	7,75E-05
	1,63E+04	1,09E+04	Sous-officiers	Post-incendie	5,32E-05		3,56E-05	
	3,00E+01	3,00E+01		Retour d'intervention	2,83E-08	5,32E-05	2,83E-08	3,56E-05
	1,63E+04	1,09E+04	Caporaux-chef	Post-incendie	4,40E-05		2,94E-05	
	3,00E+01	3,00E+01		Retour d'intervention	2,48E-08	4,40E-05	2,48E-08	2,94E-05

Tableau n°25. Résultats des effets sans seuil en fonction des différents scénarios pour le benzène

Le tableau n°26 présente les résultats pour les ERI cumulés tous polluants en fonction des deux scénarios. Si nous ramenons ces chiffres à l'effectif total de la BSPP, nous passons 0,18 cas de cancer en excès dans le scénario 1 à 0,12 cas de cancer en excès pour le scénario 2.

	Scénario 1			Scénario 2		
Grade	ERI Cumulé tout polluant	ERC par catégorie	ERC BSPP	ERI Cumulé tout polluant	ERC par catégorie	ERC BSPP
Officiers CGI (effectif = 48)	3,57E-05	1,71E-03	1,79E-01	2,39E-05	1,15E-03	1,20E-01
Sous-officiers CGI (effectif = 254)	1,16E-04	2,95E-02		7,77E-05	1,97E-02	
Sous-officiers (effectif = 488)	5,35E-05	2,61E-02		3,58E-05	1,75E-02	
Caporaux-chef (effectif = 920)	4,42E-05	4,07E-02		2,96E-05	2,72E-02	
Caporaux (effectif = 894)	3,60E-05	3,22E-02		2,41E-05	2,15E-02	
Sapeurs (effectif = 2182)	2,25E-05	4,90E-02		1,50E-05	3,28E-02	

Tableau n°26. Résultats des ERI cumulés tout polluant en fonction des différents scénarios

Le tableau n°27 compare les résultats obtenus pour les effets avec seuil à court terme entre les 2 scénarios.

		Scénario 1	Scénario 2	Scénario 1	Scénario 2
Substances	VTR (µg.m ⁻³)	Concentration (µg.m ⁻³)	Concentration (µg.m ⁻³)	QD = CMAI / VTR	QD = CMAI / VTR
Benzène	2,70E+01	1,63E+04	1,09E+04	6,04E+02	4,04E+02
CO	3,00E+04	3,31E+05	2,22E+05	1,10E+01	7,39E+00
Formaldéhyde	5,50E+01	1,60E+02	1,07E+02	2,91E+00	1,95E+00
PM 10	5,00E+01	7,10E+02	4,75E+02	1,42E+00	9,50E+00
PM 2.5	2,50E+01	4,90E+02	3,20E+02	1,96E+01	1,30E+01

Tableau n°27. Résultats pour les effets sans seuil à court terme en fonction des différents scénarios tout grade confondu

Le tableau n°28 compare les résultats obtenus pour les effets avec seuil à long terme entre les 2 scénarios proposés.

Substances	VTR ($\mu\text{g.m}^{-3}$)	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 1	Scénario 2
		Concentration ($\mu\text{g.m}^{-3}$)	Concentration ($\mu\text{g.m}^{-3}$)	QD = CMAI / VTR	QD = CMAI / VTR
Benzène	9,70E+00	9,50E+02	6,40E+02	9,79E+01	6,60E+01
CO	1,12E+02	4,69E+04	3,14E+04	4,18E+02	2,80E+02
Formaldéhyde	9,00E+00	1,90E+01	1,30E+01	2,11E+00	1,44E+00
PM 10	2,00E+01	2,17E+02	1,45E+02	1,09E+01	7,25E+00
PM 2.5	1,00E+01	1,42E+02	9,50E+01	1,42E+01	9,50E+00

Tableau n°28. Résultats pour les effets sans seuil à long terme en fonction des différents scénarios tout grade confondu

Les résultats obtenus montrent que la mise en place d'une attaque d'atténuation permet de réduire d'un tiers les quotients de danger. Cependant, il n'y a aucun QD inférieur à 1 et certains QD restent très élevés. Ces résultats soulignent l'importance d'effectuer des essais en conditions réalistes sur les attaques d'atténuation pour mesurer également le temps d'exposition, afin d'évaluer dans quelle mesure la durée d'exposition est également réduite par ces attaques, ce qui impacterait les risques prédits.

Ces résultats doivent être confirmés ou infirmés par la mise en place d'une étude expérimentale afin de pouvoir prendre des préconisations et pour de nouveaux modes d'action sur feux. Il est important de mesurer dans cette étude la mise en place du VAR simultanément à l'attaque d'atténuation pour conclure sur la réduction en teneur des substances dans l'espace post-incendie.

Il est à noter que ces résultats ne prennent pas en compte le fait que l'attaque d'atténuation ne puisse se faire qu'entre le 1^{er} et 5^{ème} étage d'un bâtiment. Il faudrait en déduire toutes les interventions qui se situent au rez-de-chaussée ou au-delà du 6^{ème} étage.

V. Discussion

A. Les incertitudes

Chaque étape de cette démarche est sujette à des incertitudes spécifiques. (HUBERT, 2003) L'identification des dangers est une démarche qualitative qui est initiée par un inventaire des différents produits susceptibles de provoquer des nuisances d'ordre sanitaire. A ce stade, les incertitudes sont liées au défaut d'information et aux controverses scientifiques. La quantification de l'exposition est soumise aux incertitudes, conséquences des connaissances acquises sur chacun des paramètres de l'équation. L'étape qui génère l'incertitude la plus difficile à appréhender est sans doute celle de la construction des relations dose-réponse, étape initiale de l'établissement des VTR.

Il est rappelé que pour les cas des produits cancérigènes sans effet de seuil, ces VTR sont considérées comme étant des probabilités de survenue de cancer excédentaire par unité de dose. Cette étape fait en effet appel à un certain nombre d'opérations qu'Hubert regroupe sous l'extrapolation, la transposition et l'analogie. Ces incertitudes ont ceci de particulier qu'elles ne

peuvent généralement pas être quantifiées dans l'état actuel des connaissances. La dernière étape de l'EQRS est la caractérisation du risque, qui est défini ici comme une « éventualité » d'apparition d'effet indésirable. Pour les produits cancérigènes sans effet de seuil, la quantification du risque consiste à mettre en relation, pour les différentes voies d'exposition identifiées, les VTR et les doses d'exposition, pour arriver à une prédiction sur l'apparition de cancers au sein d'une population exposée. Les incertitudes inhérentes à cette étape concernent, outre les modèles conceptuels utilisés pour estimer les doses pour les voies d'exposition considérées, les valeurs numériques des facteurs d'exposition qui influencent les résultats des calculs de dose (facteur d'ingestion, fréquence et durée d'exposition, poids corporel...).

Toutes ces incertitudes ne peuvent cependant pas être appréhendées de la même manière. Il est difficile à l'heure actuelle de prendre en compte l'incertitude relative aux inférences évoquées pour les VTR alors que celle relative aux différents facteurs d'exposition peut généralement être appréhendée, par des méthodes plus ou moins complexes, et par conséquent propagée dans l'estimation de la prédiction.

B. La surestimation du risque

Nous pouvons avoir surestimé le risque en prenant en compte la VTR la plus protectrice lors de la sélection de celle-ci. Il est à considérer également que la pollution de la zone d'intervention n'est sûrement pas constante dans le temps. Il existe plusieurs facteurs d'effet inconnu concernant la transposition entre l'animal et l'homme et la fiabilité et précision des mesures de concentration des toxiques. Pour cela, nous avons étudié précisément pour chaque métrologie ses critères de validité, fiabilité, précision et représentativité.

C. La sous-estimation du risque

Nous pouvons également avoir sous-estimé le risque car nous avons raisonné substances par substances et non par synergie. De plus, cette étude ne prend en compte que 4 substances sur les centaines présentes dans les fumées. Lors de la lutte contre les incendies, le sapeur-pompier effectue un effort d'une extrême intensité pendant une période de stress thermique. Cette activité entraîne une hyperventilation et une hyperthermie qui va augmenter la pénétration des substances dans l'organisme ainsi que diminuer ses capacités de défense.

Notre scénario d'exposition s'est basé sur les chiffres du BPO/BOPO des 5 dernières années. Pour obtenir le centre de secours le plus réaliste possible, il aurait fallu revenir au moins 10 années en arrière. Il se pose la question des centres de secours qui ont une activité plus soutenue que celle déterminée par notre centre de secours type. Le choix s'est fixé uniquement sur la voie d'exposition par inhalation, les voies d'expositions cutanée et orale n'ont pas été prises en compte lors de ce mémoire. Nous avons écarté le risque d'exposition à l'amiante et les dangers que représentent les retardateurs de flamme.

Il faut envisager aussi que la pénibilité du port de l'ARI soit un élément à prendre en compte. Sur incendie, il est possible qu'un chef d'équipe ou sous-officier retire l'ARI plus tôt qu'estimé dans les tableaux n°9 et n°10 page 31, sous-évaluant ainsi le risque.

D. Les limites

Il reste que cette EQRS est un ensemble de données complexes et chiffrées. Il est important de souligner les points sur lesquels un effort supplémentaire est nécessaire afin d'affiner le modèle de cette étude et la rendre plus complète. Nous nous sommes concentrés uniquement sur les feux de contenants sans prendre en compte l'intégralité des feux auxquels le sapeur-pompier de Paris peut être confronté :

- Feux de véhicules et véhicules dotés d'une nouvelle motorisation (électrique, hydrogène...) ;
- Feux de péniches ou transport de matière dangereuse ;
- Feux en caissons d'entraînements et simulateurs incendies ;

- Feux de broussailles, végétation...

La sélection des polluants dans le tableau n°13 page 34 est déterminée par plusieurs critères préalablement définis. Or il existe de très nombreux polluants qui n'ont pas été pris en compte et notamment les HAP. Il conviendrait de pouvoir mener cette EQRS en prenant le plus grand nombre de polluants possibles. Cette étude permet d'apporter des connaissances supplémentaires sur une probabilité de survenue d'un risque lors de l'exposition des sapeurs – pompiers de Paris mais elle reste limitée au vu des nombreux polluants contenus dans les fumées d'incendie. En élargissant ce choix, il faudrait également réaliser des essais grandeur nature (suivant le modèle de l'UL) en France, avec des appartements les plus représentatifs possible pour mesurer la teneur des différents toxiques. Cela nous permettrait de confronter plusieurs hypothèses afin de définir des préconisations pour l'organisation des secours.

VI. Préconisations et pistes de réflexion

Face au risque que peut engendrer le métier de sapeur-pompier de Paris, il est important de mettre en place des préconisations sûres, efficaces, faciles à mettre en œuvre, comprises et acceptables par tous. La BSPP à travers un groupe de travail sur la toxicité des fumées s'emploie à prescrire une nouvelle démarche pour prendre en compte la santé des pompiers post-incendie. La Direction Générale de la Sécurité Civile et de la Gestion des Crises (DGSCGC) a élaboré un fascicule en 2018 pour expliquer les bonnes pratiques au sapeur-pompier pendant et après un incendie. [37]

Afin d'être le plus exhaustif possible, nous reviendrons dans une première partie sur la méthode Skelleftea précédemment citée par D. Charlier dans son mémoire et nous verrons comment l'adapter dans un centre de secours. Puis nous proposerons de nouveaux outils dont un nouveau mode d'action (l'attaque d'atténuation) aux chefs de garde de la BSPP pour diminuer l'exposition des pompiers. Enfin, nous ferons un récapitulatif des différentes mesures à prendre en compte pour diminuer le risque sanitaire entre le début et la fin de l'intervention.

A. La méthode Skelleftea adaptée à la BSPP

Nous avons pu travailler entre les différents services de la BSPP sur la toxicité des fumées. Nous avons pu expliquer la méthode Skelleftea au Bureau Soutien de l'Homme (BSH). Ce modèle, élaboré en 2006 par les organisations syndicales et patronales suédoises, a reçu le titre prestigieux « Good practice Award » de l'agence européenne pour la santé et la sécurité au travail en 2011. [38]

La figure 6 représente le modèle du circuit propre et sale mis en place par la méthode Skelleftea. Le BSH, convaincu de l'importance de cette procédure, a décidé de la mettre en place à partir du 1^{er} juin 2018 au sein d'un centre de secours « test » à la caserne de Saint-Denis, 26^{ème} compagnie d'incendie et de secours, pour une durée de 6 mois.

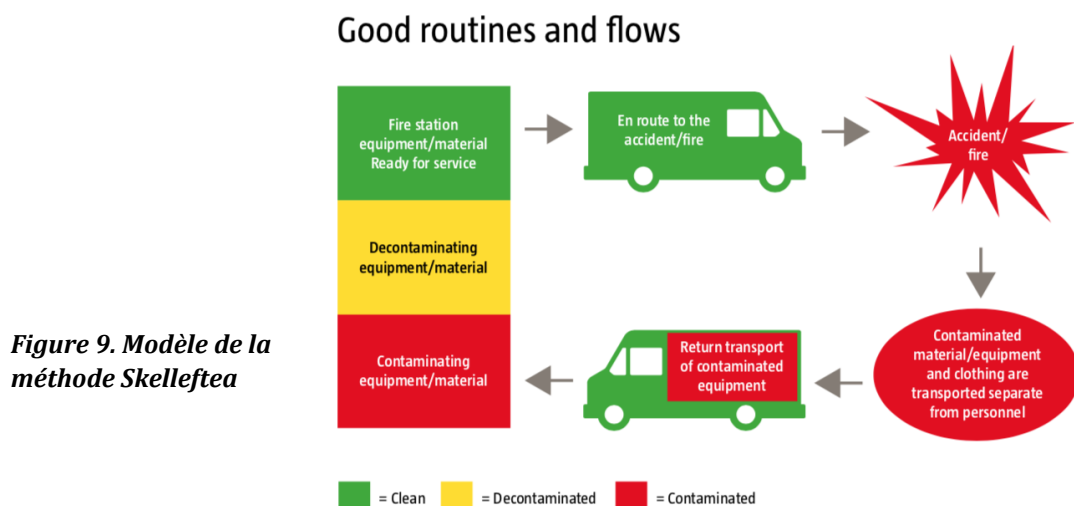


Figure 9. Modèle de la méthode Skelleftea

Cet essai permettra de voir les difficultés rencontrées afin de pouvoir l'intégrer à l'ensemble des centres de secours de la BSPP.

B. Changement dans l'organisation de la lutte contre l'incendie

1. L'attaque d'atténuation à la BSPP

L'attaque d'atténuation est un nouveau mode d'action qu'il faut prendre en compte. Nous avons pu voir par une étude théorique que son fonctionnement peut diminuer la probabilité de d'un danger. Il est donc judicieux de réaliser des essais pour obtenir des résultats chiffrés sur son impact sanitaire chez les sapeurs-pompiers de Paris. En particulier, son action pourrait également réduire le temps d'exposition sans ARI lors des phases post-incendie. Une expérimentation avec un protocole établi permettrait de le confirmer et d'évaluer l'impact sur le risque de cette réduction.

2. Le rôle renforcé de l'officier sécurité et du groupe RCP sur intervention

Il est important de mettre en place un échelon supplémentaire (un officier et un engin-pompe) sur toutes les interventions importantes car c'est sur ce type d'opération au cours desquelles nous rencontrerons le plus de personnel soumis aux fumées d'incendie. De plus, les phases de déblai peuvent être de longue durée et s'étaler sur plusieurs jours. Enfin, il paraît indispensable de systématiser la demande d'un engin pompe supplémentaire sur feu pour effectuer uniquement la phase passive du déblai.

a) L'officier sécurité

L'officier sécurité est chargé de faire appliquer les mesures collectives de sécurité en contrôlant l'ensemble des procédures, en liaison, le cas échéant, avec le chef de secteur concerné. Il se rend sur chaque opération importante. L'officier sécurité est la personne la mieux placée pour prendre en compte l'aspect santé et la dépollution des EPI sur intervention. Il devient de fait le référent et le coordinateur pour l'ensemble des personnels soumis aux fumées afin de mettre en place des préconisations. (cf. VI. C. Récapitulatif des mesures à prendre page 54, 55 et 56)

Pour mener à bien sa mission, il dispose du groupe de remise en condition du personnel composé d'un véhicule de secours et d'assistance aux victimes, d'une camionnette de réserve et d'air comprimé et du Véhicule de Remise en Condition du Personnel (VRCP).

b) Le groupe Remise en Condition du Personnel (RCP)

Avant le déploiement du groupe RCP, il convient de définir une zone selon les critères suivants :

- À proximité raisonnable du sinistre pour en faciliter l'accès au personnel concerné ;
- Suffisamment loin du sinistre pour assurer la sécurité, le confort, l'ergonomie et la fluidité de la circulation du personnel.

Dès lors et sous l'autorité de l'officier sécurité, le déploiement des engins du groupe répond à une logique chronologique d'utilisation comme indiquée sur la figure 8.

Il convient d'instaurer dans ce dispositif une partie pour la dépollution des tenues en prenant en compte toutes les préconisations énumérées dans la partie.

(cf. VI. C. Récapitulatif des mesures à prendre pages 54, 55 et 56)



Le VRCP devra disposer de protections respiratoires, oculaires et cutanées pour protéger le personnel qui sera chargé du nettoyage des EPI sur site. L'officier sécurité portera une vigilance particulière aux conditions météorologiques (notamment le vent) pour éviter toute pollution dans l'environnement. Le VRCP est doté d'EPI propres de façon à pouvoir les échanger avec ceux souillés.

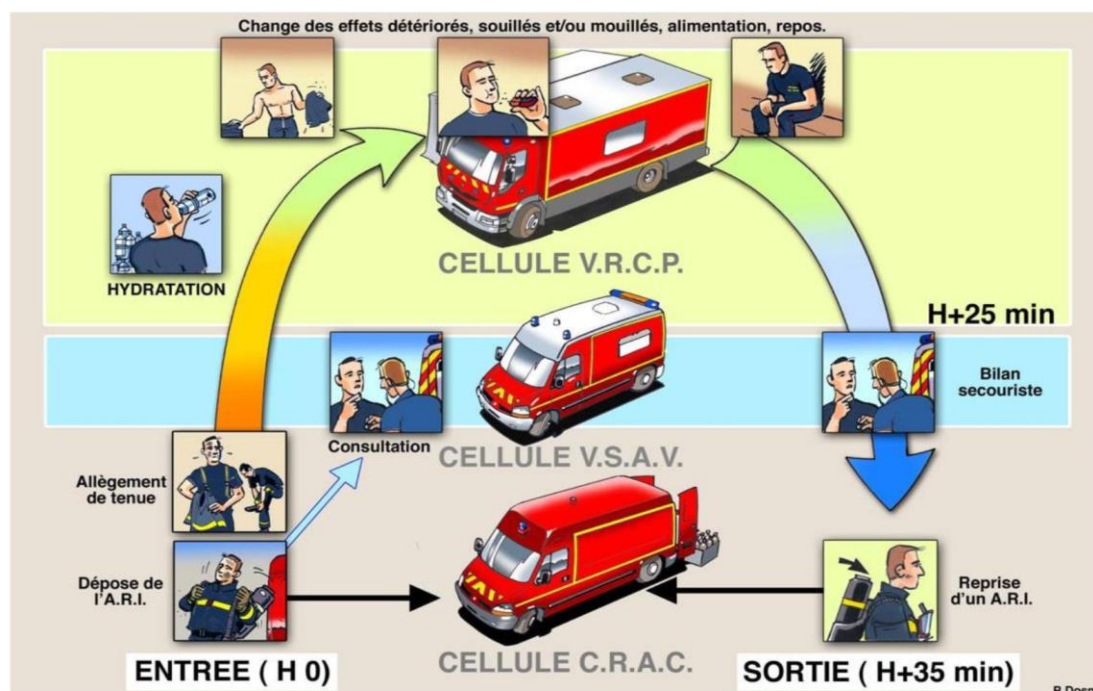


Figure 10. Modèle de remise en condition du personnel sur intervention

c) Un engin pompe dédié aux phases de déblai

Nous avons pu voir que la phase passive lors du déblai du sinistre est extrêmement sensible lorsque le personnel quitte son appareil respiratoire notamment à cause de la fatigue. De ce fait, tout COS doit penser à demander un engin pompe supplémentaire sur feu avec pour mission unique d'assurer la phase de dégarnissage et de déblai. L'équipage portera l'ARI tout au long de la mission afin de se protéger physiquement contre les différents polluants. Si le déblai est de longue durée, le COS doit anticiper et demander un nombre d'équipes suffisants pour permettre des rotations. L'utilisation d'un matériel plus léger que l'ARI doit être étudiée pour soulager l'effort des binômes. En revanche, le matériel ne doit pas perdre en efficacité. La mise en place d'un dispositif d'évacuation de déblai par l'extérieur doit être étudiée afin de raccourcir cette phase.

À terme, on peut envisager d'externaliser cette phase pour supprimer le risque lié aux fumées d'incendie et de reprise du feu chez les sapeurs-pompiers.

3. Etablir 3 niveaux de dépollution post-incendie en fonction de l'importance du sinistre

Nous pouvons établir 3 niveaux pour le nettoyage des EPI lors d'un incendie. En effet, en fonction de l'intensité et la durée du sinistre, de l'engagement et du type d'intervention, la dépollution des effets souillés peut grandement varier. Nous distinguons :

- Le degré de souillure superficiel ;
- Le degré de souillure important ;
- Le degré de souillure trop élevé.

Le degré de souillure s'évalue à la vue et sera déterminé par le chef d'agrès de l'engin. Pour chaque nettoyage, quel que soit le degré, le personnel sera doté au minimum d'une protection respiratoire (masque FFP3, ARI...), oculaire et cutanée (gants nitriles).

a) Le degré de souillure superficiel

Il s'agit d'un nettoyage léger des EPI que l'utilisateur doit effectuer, s'il a été exposé à un ou à plusieurs contaminants, sans que ces éléments soient mis hors service. Il a pour but de rendre les effets suffisamment propres pour être réutilisés. Ce type de nettoyage est de la responsabilité du pompier. Le nettoyage des souillures superficielles doit, dans la mesure du possible, se faire sur les lieux de l'intervention. Cette étape contribue à éliminer ou à limiter la contamination de

l'habitacle du véhicule et de la caserne. Pour se faire, le sapeur-pompier doit :

- Enlever tout résidu par brossage léger à sec ;
- Compléter si besoin en rinçant soigneusement avec de l'eau en débit minimum avec la lance du dévidoir tournant.

b) Le degré de souillure important

Tous les EPI souillés et présentant des dépôts gras seront isolés dans des sacs étanches jusqu'au retour à la caserne. Une fois dans le centre de secours, les effets seront retirés du sac par un personnel (de préférence sensibilisé au risque des fumées et suies d'incendie) doté de protections respiratoires, oculaires et cutanées dans un espace à l'air libre. Puis les effets seront frottés par une brosse avec de l'eau savonneuse et rincés à grande eau en prenant en compte les eaux de ruissellement. Les EPI seront mis à laver dans des machines industrielles prévues à cet effet.

c) Le degré de souillure trop élevé

Tous les EPI grandement souillés et présentant des dépôts gras importants seront isolés dans des sacs étanches jusqu'au retour à la caserne. Dans un cas extrême et lors d'une opération importante, un vecteur différent (type camionnette Renault trafic) pourra être sollicité afin de ramener les effets au centre de secours. Cette décision sera prise à minima par le chef de garde. Les sacs étanches seront mis dans un local ventilé et isolé en attendant qu'ils soient évacués par la société spécialisée pour un nettoyage industriel sur un site dédié.

C. Récapitulatif des mesures à prendre en compte

De façon à synthétiser l'ensemble des préconisations existantes et de les adapter à l'organisation BSPP, nous proposons de faire un récapitulatif dans le tableau n°29 des mesures avant, pendant et après l'intervention en soulignant les différents acteurs s'y rapportant. Ces mesures s'inspirent du rapport final de la Caisse Nationale de Retraites des Agents des Collectivités Locales (CNRACL) [39], de la DGCSGC et du groupe de travail « toxicité des fumées » à la BSPP.

Nature des actions	Actions	Acteurs
Avant l'intervention		
Informier et former	Sensibiliser et informer l'ensemble des sapeurs-pompiers sur les effets à court et long terme de la toxicité des fumées et des résidus de combustion lors des différentes phases d'intervention en insistant sur la formation initiale.	GFIS
	Intégrer les risques de pollution lors de la conception des centres d'incendie et de secours, des centres de formation, des engins, des matériels et des équipements.	BOSI / BSH
	Développer la culture de la prévention et la prise de conscience du risque spécifique lié aux expositions aux fumées lors des cycles de formation. Prévoir une sensibilisation particulière au garde remise, responsable logistique du matériel et des engins.	QSSE / GFIS
	Prévoir un affichage dans les remises sur la sensibilisation du risque fumée et sur les différents protocoles de nettoyage.	QSSE
Prévenir et dépister	Mettre en place un système de veille des connaissances techniques et scientifiques	BEP
	Mettre à jour les fiches d'exposition (obligation réglementaire) en intégrant les risques liés aux fumées.	BSP
	Assurer la traçabilité des personnels exposés en mettant en place une visite médicale systématique chaque année et optimiser le système ADAGIO pour obtenir un suivi informatisé d'exposition aux fumées (date, type d'intervention, port de l'ARI et durée d'exposition) permettant de tracer, et éventuellement d'estimer, l'exposition aux fumées et aux résidus de combustion.	BSP / SSI
	Identifier le risque amiante dans les dossiers spécifiques ETARE.	BPO
Agir sur l'organisation	Disposer d'une réserve de vêtements, gants et cagoules dans les centres de secours et les VRCP permettant d'équiper le personnel pour toute nouvelle intervention sur les incendies.	BSH
	S'inspirer du périmètre de sécurité (zone d'exclusion, contrôlée et de soutien) concernant les risques NRBC ou d'explosion pour toutes les interventions pour feu.	BPO
	Adapter, voire réorganiser, les locaux avec un zonage et un circuit « pollué - dépollué » (voir modèle Skelleftea). À défaut, prévoir des mesures organisationnelles.	BOSI / BSH / CMAI
	Privilégier les couleurs claires pour les tenues et les cagoules permettant ainsi de visualiser correctement le niveau de salissure.	BSH

Pendant l'intervention		
Prévenir et dépister	Considérer que chaque incendie est une intervention exposant potentiellement aux risques CMR, amiante...	
	Lors des phases de lutte contre l'incendie, tout personnel intervenant en « zone d'exclusion » (supposée polluée) doit porter une tenue de feu complète ainsi que l'ARI.	CGI - Officier sécurité
	Dans les phases de déblai et de surveillance, considérer la présence de contaminants et prévoir en conséquence la protection respiratoire par l'utilisation de l'ARI ou tout autre appareil respiratoire adapté.	CGI - Officier sécurité
	Dans les phases de déblai et de surveillance, utiliser des sous-gants à usage unique ou pouvant être facilement décontaminés (nitrile, coton...), en complément des gants de protection contre l'incendie.	CGI - Officier sécurité
Agir sur l'organisation	A l'arrivée des secours, un stationnement des engins avec vitres et ventilations fermées doit être privilégié en dehors de la zone d'exposition aux fumées (avoir une vigilance particulière de la zone sous le vent).	CGI
	Systématiser la mise en place du ventilateur auxiliaire relais pour la phase de déblai afin d'assainir l'atmosphère.	CGI
	Déterminer un zonage de l'intervention dans lequel les personnels porteront une protection respiratoire adaptée.	Officier sécurité
	Mettre en place un protocole de dépollution après avoir déterminé le niveau de souillure en favorisant la mise en place d'une zone RCP.	Chef d'agrès - CGI
	Précéder l'engagement des équipes et l'attaque du feu par l'intérieur par une attaque d'atténuation afin de diminuer le temps d'exposition.	CGI
	Mettre en place des dispositifs d'évacuation de déblai par l'extérieur afin de faciliter et réduire les phases post-incendie.	CGI
	Mettre en place une surveillance des polluants détectables (<i>à définir</i>) permettant d'imposer ou de retirer l'ARI selon la concentration et la température du volume.	BEP
	Pendant les phases de remise en condition du personnel, veiller à éviter toute pollution.	Officier sécurité
	Généraliser le VRCP et le rendre obligatoire sur les interventions importantes.	BPO
	Un lavage systématique des mains et des effets chaussants doit être effectué avant de réintégrer le véhicule.	CGI

Après l'intervention		
Agir sur l'organisation	Considérer que chaque vêtement présentant des résidus de combustion ou, à minima, « sentant la fumée » après intervention sur un feu, est contaminé et contaminant.	Chef d'agrès
	Pour le personnel chargé du nettoyage, utiliser des tenues et des équipements de protection adaptés (sous- gants coton ou nitrile, lunettes de protection, protection respiratoire...).	Chef de remise
	Laver, voire dépolluer, tous les matériels (EPI, tuyaux, ARI...) et les tenues (cagoule, gants, casque) utilisés, après chaque intervention sur feu.	Chef d'agrès
	Envoyer au nettoyage les tenues de feu dès lors qu'elles sont considérées comme contaminées.	Chef du SSH
	Vérifier au moins une fois par an que les prescriptions du fabricant relatives au nettoyage des tenues sont respectées.	Chef du SSH
	Disposer d'effets chaussants différents selon l'activité (bureau/caserne/ambulance/feu).	BSH
	Pendre une douche en commençant par de l'eau fraîche pour éliminer les polluants sur la peau et éviter que les pores de la peau se dilatent et favorisent l'absorption des contaminants, changer de tenue et de sous-vêtements dès le retour de l'intervention et mettre des vêtements propres.	BSH
	Organiser un circuit de gestion des effets pollués.	Chef du BSH
	Ne pas tolérer les EPI dans les parties communes et proscrire les contacts du public avec les EPI lors des visites.	Chef de garde
	Mettre en place un retour d'expérience sur les interventions importantes pour améliorer le système et valoriser les bonnes pratiques.	BPO

Tableau n°29. Synthèse des préconisations pour la mise en œuvre de précautions sur la santé des sapeurs-pompiers

VII. Conclusion

L'objectif de ce mémoire était de pouvoir mesurer l'impact sanitaire des différents modes d'action dans la lutte contre un feu de contenant afin de savoir si cela réduit l'exposition aux gaz et fumées d'incendie des sapeurs-pompiers de Paris.

Pour réaliser ce sujet, nous avons commencé par une revue de l'ensemble de la littérature s'exprimant sur les risques liés à l'activité du métier de sapeurs-pompiers. Puis de manière à pouvoir étudier différents modes d'extinction, nous avons développé une étude réalisée aux Etats-Unis portant sur une attaque par l'extérieur au moyen d'une lance à eau : l'attaque d'atténuation. Le but de cette étude était de souligner l'importance de faire des essais avec le LCPP pour mesurer l'impact d'une telle attaque sur les feux de contenants en France.

Ensuite nous avons exploité et synthétisé les nombreuses études concernant les concentrations des polluants composant les gaz et fumées d'incendie qui appuient la présence d'agents toxiques dans ces gaz et fumées. Après avoir déterminé plusieurs critères de choix, nous avons sélectionné le benzène, le formaldéhyde, le monoxyde de carbone, les PM_{2.5} et les PM₁₀ dans le cadre de ce mémoire.

Pour mener à bien notre EQRS, nous avons repris une matrice d'exposition déjà existante chez les sapeurs-pompiers de Paris. Notre travail a été d'affiner au maximum cette matrice afin d'être le plus réaliste possible sur la situation opérationnelle. Nous avons passé au crible 113 MCO pour obtenir des résultats fiables quant à la durée sur feu des phases post-incendie et retour d'intervention. Nous avons terminé par une revue scientifique des valeurs toxicologiques de référence pour chacun des polluants afin de sélectionner celle qui est la plus pertinente pour notre sujet.

Ces recherches nous ont permis de calculer un excès de risque individuel pour les effets sans seuil et un quotient de danger pour les effets avec seuil.

Nous avons montré qu'il existe un excès de risque collectif de développer un cancer, lié à l'exposition aux fumées et gaz d'incendie. Pour tout grade confondu, le benzène est la substance la plus dangereuse.

Concernant les effets sans seuil, l'ensemble des polluants possèdent un quotient de danger largement supérieur à 1 pour les expositions aiguës et chroniques.

Au vu de ces chiffres, il paraît important de mettre en place des préconisations rapides, sûres, efficaces et pragmatiques pour diminuer voire supprimer cette exposition. Ces préconisations doivent être définies avant, pendant et après l'intervention et agir dans les domaines de l'information et la formation, de la prévention et du dépistage, ainsi que sur la modification de l'organisation.

Pour agir sur l'organisation, la BSPP en lien avec le LCPP doit mener des essais sur les différents modes d'action pour parvenir à l'extinction d'un incendie afin de déterminer son efficacité pour réduire l'émission des substances toxiques. En particulier, nos résultats suggèrent que les attaques d'atténuation pourraient contribuer à diminuer les risques sanitaires.

Les données proposées dans ce mémoire sont à manipuler avec prudence car il reste de nombreuses incertitudes. La constitution d'une cohorte exposé/non exposé (personnel dans les bureaux) permettrait d'observer à travers une étude épidémiologique le risque d'une exposition sur la santé à long terme aux fumées et gaz d'incendie chez les sapeurs-pompiers de Paris.

VIII. Bibliographie

- [1] « Evaluation of Dermal Exposure to Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Firefighters ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.fireengineering.com/articles/2013/12/evaluation-of-dermal-exposure-to-polycyclic-aromatic-hydrocarbons-in-firefighters.html>. [Consulté le: 03-avr-2017].
- [2] S. Lacey, B. M. Alexander, et C. S. Baxter, « Plasticizer contamination of firefighter personal protective clothing-- a potential factor in increased health risks in firefighters », *J. Occup. Environ. Hyg.*, vol. 11, n° 5, p. D43-48, 2014.
- [3] C. S. Baxter, J. D. Hoffman, M. J. Knipp, T. Reponen, et E. N. Haynes, « Exposure of firefighters to particulates and polycyclic aromatic hydrocarbons », *J. Occup. Environ. Hyg.*, vol. 11, n° 7, p. D85-91, 2014.
- [4] « UL Study on Firefighter Exposure to Smoke Particles ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.fireengineering.com/articles/2010/11/ul-study-exposure.html>.
- [5] E. Pukkala *et al.*, « Cancer incidence among firefighters: 45 years of follow-up in five Nordic countries », *Occup. Environ. Med.*, vol. 71, n° 6, p. 398-404, juin 2014.
- [6] D. C. Glass, S. Pircher, A. Del Monaco, S. V. Hoorn, et M. R. Sim, « Mortality and cancer incidence in a cohort of male paid Australian firefighters », *Occup. Environ. Med.*, vol. 73, n° 11, p. 761- 771, nov. 2016.
- [7] U. NIST et U. UL, « Governors Island ».
- [8] E. R. Fischesser et University of Cincinnati – Fire Science Department, « Applying the UL Ventilation Study to Modern Firefighting Strategies ».
- [9] BSPP, *BSP 200.10 Règles d'engagement des secours*.
- [10] BSPP, *BSP 118.1 Règlement de l'organisation et du fonctionnement du service d'incendie et de secours*.
- [11] BSPP, *BSP 200.19 Description des équipements et matériels utilisables par les sapeurs-pompiers*.
- [12] jauzein, « Petit glossaire thématique d'épidémiologie — Acces ». [En ligne]. Disponible sur: <http://acces.ens-lyon.fr/acces/ressources/sante/epidemiologie/GlossairEpidem/GlossEpidThemes>.
- [13] R. D. Daniels *et al.*, « Mortality and cancer incidence in a pooled cohort of US firefighters from San Francisco, Chicago and Philadelphia (1950-2009) », *Occup. Environ. Med.*, vol. 71, n° 6, p. 388-397, juin 2014.
- [14] G. K. LeMasters *et al.*, « Cancer risk among firefighters: a review and meta-analysis of 32 studies », *J. Occup. Environ. Med.*, vol. 48, n° 11, p. 1189-1202, nov. 2006.
- [15] B. Amadeo *et al.*, « French firefighter mortality: analysis over a 30-year period », *Am. J. Ind. Med.*, vol. 58, n° 4, p. 437-443, avr. 2015.
- [16] « Cohorte CPRIM - Bilan scientifique de la mortalité des sapeurs-pompiers professionnels | CFDT - Pompiers PATS ».
- [17] « Mortality amongst Paris fire-fighters », *ResearchGate*. [En ligne]. Disponible sur: https://www.researchgate.net/publication/14344597_Mortality_amongst_Paris_fire-fighters.
- [18] J. LANFRANCA, « L'impact sanitaire (aigu et chronique) de l'exposition aux gaz non cancérigène chez les sapeurs-pompiers de Paris dans les locaux d'habitation : vers des mesures de prévention ».
- [19] D. CHARLIER, « L'impact sanitaire chez les sapeurs-pompiers de Paris de l'exposition chronique aux polluants atmosphériques lors des phases post extinction des feux de contenants ».
- [20] « Impact of Ventilation on Fire Behavior in Legacy and Contemporary Residential Construction - Global Fire Research ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.globalfireresearch.com/reports/research/impact-of-ventilation-on-fire-behavior-in-legacy-and-contemporary-residential-construction>.

- [21] RecyConsult, « Evaluation quantitative des risques sanitaires est une définition du dictionnaire environnement et du développement durable », *Dictionnaire-environnement*.
- [22] C. CHIVAS, J. CESCOT, et INERIS, « Formalisation du savoir et des outils dans le domaine du risque majeur. Toxicité et dispersion des fumées d'incendie. », 57149.
- [23] E. Guillaume, F. Didieux, A. Thiry, et A. Bellivier, « Real-scale fire tests of one bedroom apartments with regard to tenability assessment », *Fire Saf. J.*, vol. 70, p. 81-97, nov. 2014.
- [24] « Cardiovascular and Chemical Exposure Risks on the Modern Fireground ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.fireengineering.com/webcasts/2016/04/cardiovascular-and-chemical-exposure-risks.html>.
- [25] Rapport d'expertise collective, « Évaluation des risques liés à l'exposition aux retardateurs de flamme dans les meubles rembourrés », Saisine n° « 2011 – SA-0132 », sept. 2015.
- [26] « FIREFIGHTER EXPOSURE TO SMOKE PARTICULATES | Command Safety ».
- [27] Avis de l'Anses et Rapport d'expertise collective, « Valeurs limites d'exposition en milieu professionnel Le monoxyde de carbone », Saisine n°2007-SA-0422, avr. 2011.
- [28] Avis de l'Anses et Rapport d'expertise collective, « Concentrations de CO2 dans l'air intérieur et ses effets sur la santé », Saisine n° « 2012-SA-0093 », juill. 2013.
- [29] Avis de l'Anses et Rapport d'expertise collective, « Élaboration de VTR aiguë, subchronique et chronique par voie respiratoire pour l'ammoniac », Saisine n° 2016-SA-0118, janv. 2018.
- [30] International Agency for Research on Cancer, *Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*. Lyon, France, 2010.
- [31] Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'Environnement et du Travail, « Évaluation des effets sur la santé et des méthodes de mesure des niveaux d'exposition sur le lieu de travail pour le toluène », juin 2008.
- [32] Avis de l'AFSSET et Rapport d'expertise collective, « Valeurs guides de qualité d'air intérieur - Les particules », janv. 2010.
- [33] LCPP, « Evaluation de l'exposition des professionnels aux polluants de l'air sur des scènes incendie », sept. 2002.
- [34] H. ESCARRAT et A. LACOSTE, « Evaluation du risque chimique professionnel lors des manoeuvres de noyage et de déblai. », BMPM - Service médical, 2004.
- [35] G. THIAULT, « Evaluation de l'impact de la contamination par les fumées d'incendie des équipements de protection individuels des sapeurs-pompiers de Paris sur la qualité de l'air de leur environnement de travail. », Rapport d'essai N°15/13400/RG1, mars 2016.
- [36] INVS et AFFSET, « ESTIMATION DE L'IMPACT SANITAIRE D'UNE POLLUTION ENVIRONNEMENTALE ET EVALUATION QUANTITATIVE DES RISQUES SANITAIRES », nov. 2007.
- [37] « Guide de doctrine relatif à la prévention contre les risques de toxicité liés aux fumées d'incendie ».
- [38] Swedish Civil Contingencies Agency, « Healthy firefighters - The Skelleftea Model improves the work environment », MSB849, juin 2015.
- [39] « Rapport CNRACL - Dangerosité des fumées chez les sapeurs-pompiers | CFDT - Pompiers PATS ».

IX. Liste des tableaux et figures

Tableau n°1. Etudes épidémiologiques sur les expositions aux fumées et gaz d'incendie chez les pompiers *Page 14*

Tableau n°2. Etudes sur la toxicité des fumées et gaz d'incendie *Page 20*

Tableau n°3. Synthèse des produits chimiques dans les fumées et gaz d'incendie, leurs impacts sur la santé et leur origine *Page 29*

Tableau n°4. Données de répartition *Page 30*

Tableau n°5. Durée des interventions pour feux de contenants *Page 31*

Tableau n°6. Extrait du tableau statistique (h) *Page 31*

Tableau n°7. Extrait du tableau statistique (%) *Page 31*

Tableau n°8. Découpage temporel d'une intervention *Page 32*

Tableau n°9. Durée d'exposition hors port de l'ARI EP CGI *Page 32*

Tableau n°10. Durée d'exposition hors port de l'ARI EP non CGI *Page 32*

Tableau n°11. Synthèse des données opérationnelles par catégories d'engin-pompe *Page 33*

Tableau n°12. Analyse du temps annuel passé hors ARI du sapeur-pompier par grade sur incendie *Page 33*

Tableau n°13. Choix des polluants en fonction des critères retenus *Page 36*

Tableau n°14. Tableau sur les choix des VTR *Page 38*

Tableau n°15. Quantification du temps d'exposition vie entière par catégorie *Page 40*

Tableau n°16. Récapitulatif des valeurs des polluants pour la phase de déblai *Page 41*

Tableau n°17. Récapitulatif des valeurs maximales et médianes des polluants pour le BMPM *Page 42*

Tableau n°18. Récapitulatif des valeurs des polluants pour la phase de retour d'intervention *Page 42*

Tableau n°19. Résultats de la caractérisation du risque pour les effets aigus avec seuil *Page 43*

Tableau n°20. Résultats de la caractérisation du risque pour les effets chroniques avec seuil *Page 44*

Tableau n°21. Résultats de la caractérisation du risque pour les effets sans seuil *Page 46*

Tableau n°22. Résultats des ERI cumulés et ERC tout polluant *Page 46*

Tableau n°23. Résultats des limites d'emploi de l'attaque d'atténuation *Page 47*

Tableau n°24. Concentrations de polluants estimées après une attaque d'atténuation *Page 48*

Tableau n°25. Résultats des effets sans seuil en fonction des différents scénarios pour le benzène *Page 49*

Tableau n°26. Résultats des ERI cumulés tout polluant en fonction des différents scénarios *Page 49*

Tableau n°27. Résultats pour les effets sans seuil à court terme en fonction des différents scénarios tout grade confondu *Page 49*

Tableau n°28. Résultats pour les effets sans seuil à long terme en fonction des différents scénarios tout grade confondu *Page 50*

Tableau n°29. Synthèse des préconisations pour la mise en œuvre de précautions sur la santé des sapeurs-pompiers *Page 56*

Figure 1. Cartographie du secteur BSPP *Page 9*

Figure 2. Plan de coupe d'une maison lors des essais de l'UL et du NIST *Page 17*

Figure 3. Schéma du modèle du risque *Page 20*

Figure 4. Paradigme de l'évaluation du risque *Page 20*

Figure 5. Synoptique de caractérisation du terme source de l'incendie *Page 20*

Figure 6. Zones de dépôts de particules dans les voies respiratoires humaines *Page 26*

Figure 7. Effectif d'une caserne type *Page 30*

Figure 8. Volume de gaz lors d'un feu de sous-sol avec une attaque d'atténuation *Page 48*

Figure 9. Modèle de la méthode Skelleftea *Page 52*

Figure 10. Modèle de remise en condition du personnel sur intervention *Page 54*

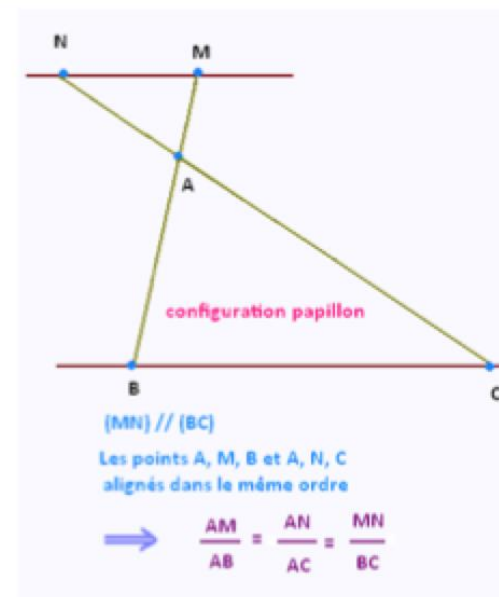
X. Annexes

A. Annexe 1 – Calcul de la distance en théorie d'une attaque d'atténuation sur un bâtiment Haussmannien

Bâtiment Haussmannien



Le théorème de Thalès, la configuration papillon



$$NM = 1,50 \text{ m}$$

$$AB = 3 \cdot n + 0,80 + 0,20$$

$$MA = 1,60 \text{ m}$$

$$n = \text{nombre d'étages}$$

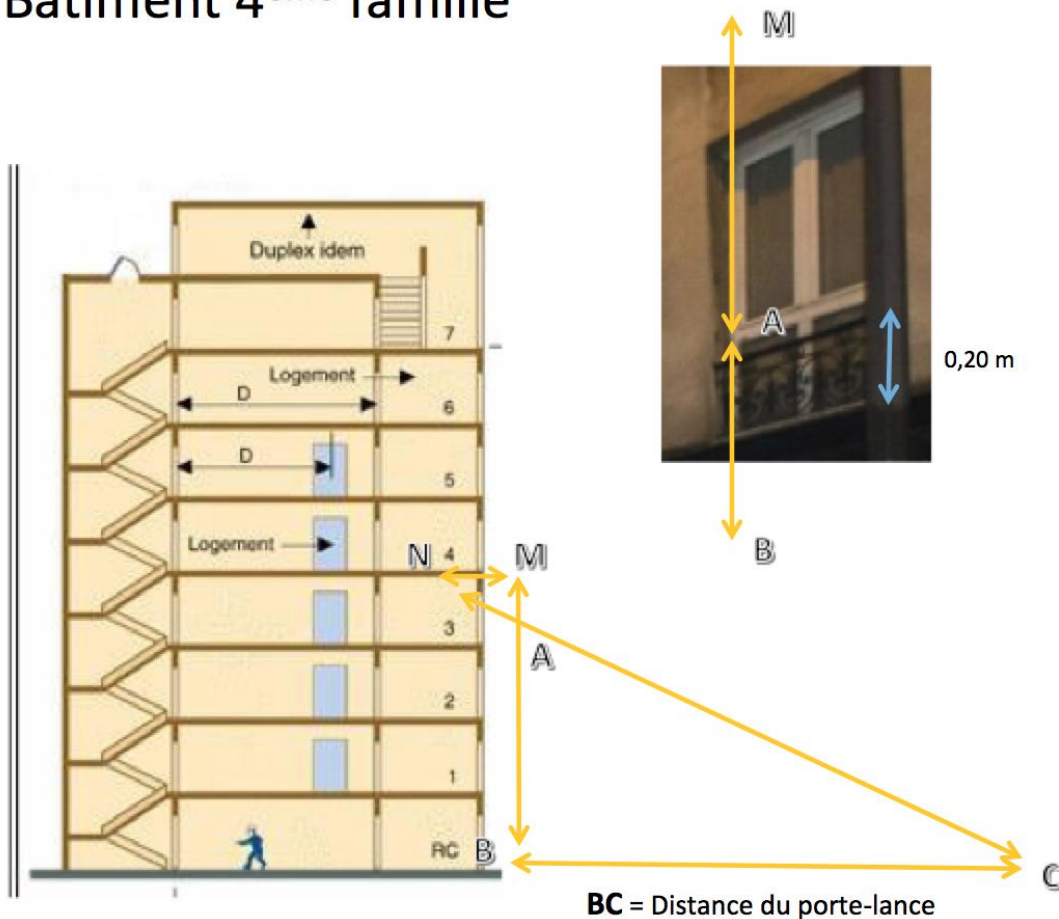
BC = Distance du porte-lance C

$$BC = n \times 4,50 / 1,60 + 0,94$$

Hauteur de plafond = 2,60 m – Hauteur sous fenêtre = 0,80 m – Hauteur d'un étage = 3m

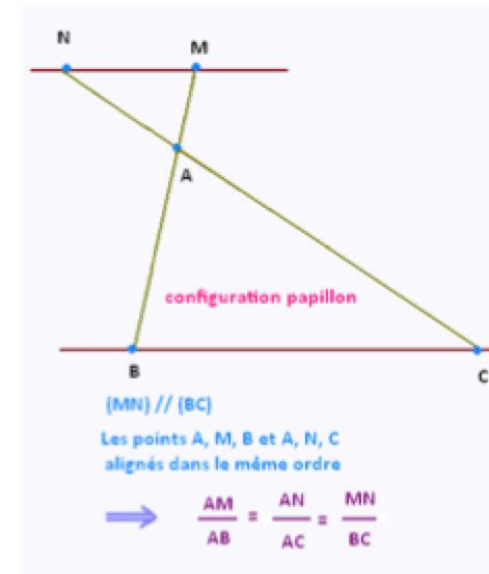
B. Annexe 2 – Calcul de la distance en théorie d’une attaque d’atténuation sur un bâtiment 4^{ème} famille

Bâtiment 4^{ème} famille



Hauteur de plafond = 2,80 m – Hauteur sous fenêtre = 0,90 m – Hauteur d'un étage = 3m

Le théorème de Thalès, la configuration papillon



NM = 1,50 m
AB = 3*n + 0,90 + 0,20
MA = 1,70 m
n = nombre d'étages

$$BC = n \times 4,50 / 1,70 + 0,97$$