

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS

Centre de PARIS

MEMOIRE

Présenté en vue d'obtenir le

DIPLOME D'INGENIEUR SPECIALITE GESTION DES RISQUES

Par

Joffrey DIRAND

**« EVALUATION DE L'IMPACT SANITAIRE LIE A L'UTILISATION
D'UN BROUILLARD D'EAU BASSE PRESSION DANS LA LUTTE
CONTRE LES FEUX DE CONTENANTS CHEZ LES SAPEURS-
POMPIERS DE PARIS. »**

Soutenu le 12 mars 2020

Président du Jury : Madame Laura TEMIME – Professeur des universités

Assesseurs : Madame Maité SYLLA – Professeur des universités
Monsieur Kévin JEAN – Maitre de conférence
Madame Laetitia JAFFRE – Ingénieur sécurité sanitaire

Maître de stage : Lieutenant-colonel Fabian TESTA – Adjoint au chef du bureau études et prospective

Tutrice académique : Laura TEMIME – Professeur des universités

Lexique

AFSSET

Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail

ANSES

Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

BSPP

Brigade de sapeurs-pompiers de Paris

CIRC

Centre international de recherche sur le cancer

CMR

Cancérogènes, mutagènes et reprotoxiques

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 volatiles

DGSCGC

Direction générale de la sécurité civile et de la gestion des crises

EPA

Environmental protection agency

EPI

Équipement de protection individuelle

EQRS

Évaluation quantitative du risque sanitaire

ERC

Excès de risque collectif

ERI

Excès de risque individuel

FET

Facteur d'équivalence toxique

HAP

Hydrocarbures aromatiques polycycliques

INERIS

Institut national de l'environnement et des risques

INRS

Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles

InVS

Institut de veille sanitaire

LCPP

Laboratoire central de la préfecture de police

NIOSH

National institute for occupational safety and health

OMS

Organisation mondiale de la santé

PM

Particulate matter (particules fines)

QD

Quotient de danger

RIS

Rapport d'incidence standardisé

RMS

Rapport de mortalité standardisé

ROFSIS

Règlement sur l'organisation et le fonctionnement du service d'incendie et de secours

SIS

Service d'incendie et de secours

TEO

Temps d'engagement opérationnel

VTR

Valeurs toxicologiques de référence

Remerciements

Je remercie tout particulièrement le lieutenant-colonel Fabian TESTA de m'avoir permis de participer à cette aventure et également pour sa confiance et ses conseils avisés tout au long de ce travail.

Je tiens également à remercier ma tutrice académique, la professeure Laura TEMIME, de m'avoir orienté et encadré tout au long de la rédaction de ce mémoire.

Je désire aussi lui exprimer ma reconnaissance, ainsi qu'au professeur William DAB et à l'ensemble des intervenants rencontrés au conservatoire national des arts et métiers, pour la qualité de leurs enseignements et les nombreux échanges au cours de mon cursus d'ingénieur.

Je remercie les agents du laboratoire central de la préfecture de police, en particulier Madame Fanny RIEUNIER, Messieurs Guénaël THIAULT, Eddie FAURE et Aurélien THIRY, pour leur disponibilité et leurs conseils au cours de la campagne d'essais liée à cette étude.

Plus généralement, je désire exprimer toute ma reconnaissance à tous ceux qui ont porté un intérêt particulier à ce travail. Parmi eux, j'adresse mes sincères remerciements à mon encadrement, le capitaine Pierre de BOUVIER, le capitaine Alexandre FRANTZ, l'adjudant Mathieu GOERGEN et à mon prédécesseur au CNAM, Julien VALDENNAIRE.

Enfin, je remercie ma conjointe et l'ensemble de mes proches pour leur soutien depuis le début de mon parcours d'ingénieur.

Résumé

L'évolution de la conception des bâtiments d'habitation et l'utilisation de nouveaux matériaux introduisent de nouveaux risques pour les sapeurs-pompiers dont une toxicité des fumées accrue. L'utilisation d'un brouillard d'eau pour lutter contre l'incendie pourrait réduire l'exposition à ces fumées.

L'objectif de cette étude est de mesurer l'impact sanitaire d'un brouillard d'eau produit par fragmentation hydropneumatique sur cette exposition aux fumées au cours de la phase « post-extinction », dédiée aux opérations de déblai.

Pour réaliser ce mémoire, différents polluants ont été identifiés et mesurés dans un cadre expérimental. Ensuite, le temps d'exposition a été estimé à travers une matrice d'exposition. Enfin, l'utilisation d'une approche d'évaluation quantitative des risques sanitaires permet de comparer l'exposition aux fumées dans le cadre d'une attaque classique avec l'utilisation d'un brouillard d'eau.

L'utilisation de la brumisation démontre un effet « protecteur », l'impact sanitaire lié à l'exposition aux fumées étant réduit par rapport à l'usage d'une lance traditionnelle.

Un risque d'apparition de cancer en excès existe particulièrement avec l'emploi de moyens d'extinction traditionnels et pour la population ayant une longue période d'exposition.

Malgré l'usage de ce nouveau moyen d'extinction, le niveau de risque hors cancer demeure élevé pour certaines substances toxiques. Il est donc nécessaire de mettre en place des actions de prévention afin de diminuer l'exposition de manière générale.

Mots clés : brumisation, brouillard d'eau, fumées incendie, excès de risque, quotient de danger, évaluation quantitative des risques sanitaires.

Abstract

The building evolution and the use of new construction materials introduce new risks for firefighters as well as an increased smoke toxicity. A water-mist system in fire fighting operations could reduce the exposure to toxic smoke.

The purpose of this study is to measure the sanitary impact of water-mist system produced by hydraulic and pneumatic fragmentation, to smoke exposure during the post-extinguish phase which is excavating operation.

In order to realize this paper different pollutants have been identified and measured in an experimental context. Then we have estimated the exposure time through an exposure matrix. Finally, the use of a quantitative assessment of sanitary risks approach allows to compare the smoke exposure between the two methods of fire extinguishment : classic fire attack and water-mist system.

The use of water-mist fire fighting system has demonstrated a higher protection to smoke than the conventional water jet.

There is an excess risk of cancer emergence particularly with the use of conventional water jet and for firefighters exposed for a longer time.

Despite the use of new technology of firefighting, firefighters are still at an increased risk for different types of diseases excluding cancer due to the smoke and hazardous chemicals they are exposed. It is necessary to establish preventive actions to reduce the health impact.

Keywords : water-mist firefighting system, smoke fire, excess risk, risk quotient, quantitative assessment of sanitary risks.

Table des matières

I.	Introduction.....	6
II.	Contexte.....	8
A.	Présentation de la BSPP.....	8
B.	La toxicité des fumées chez les sapeurs-pompiers.....	9
1.	<i>Méta-analyse relative au risque de cancer parmi les sapeurs-pompiers.....</i>	<i>9</i>
2.	<i>Les études liées à la toxicité des fumées à la BSPP.....</i>	<i>9</i>
C.	L'emploi du brouillard d'eau.....	10
1.	<i>La lutte contre l'incendie par brouillard d'eau.....</i>	<i>10</i>
2.	<i>L'impact d'un brouillard d'eau sur les fumées d'incendie.....</i>	<i>12</i>
D.	Contexte spécifique à la BSPP.....	13
III.	Méthodes.....	14
A.	La méthode EQRS.....	14
1.	<i>Structure de la démarche d'EQRS.....</i>	<i>14</i>
2.	<i>Pertinence de la méthode dans le cadre de cette étude.....</i>	<i>15</i>
B.	Identification des dangers.....	15
C.	Estimation de l'exposition.....	17
1.	<i>Définition du scénario d'exposition.....</i>	<i>17</i>
2.	<i>Matrice d'exposition chez les sapeurs-pompiers de Paris.....</i>	<i>17</i>
D.	Protocole expérimental.....	19
1.	<i>Description du cadre expérimental.....</i>	<i>19</i>
2.	<i>Description des essais et de la stratégie d'échantillonnage.....</i>	<i>20</i>
IV.	Résultats.....	21
A.	Identification des dangers.....	21
1.	<i>Les Composés Organiques Volatils (COV).....</i>	<i>21</i>
2.	<i>Les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP).....</i>	<i>23</i>
3.	<i>Le monoxyde de carbone (CO).....</i>	<i>23</i>
4.	<i>Les particules.....</i>	<i>24</i>
B.	Estimation de la relation dose-réponse.....	27
1.	<i>Méthode de sélection des VTR.....</i>	<i>27</i>
2.	<i>VTR sélectionnées.....</i>	<i>27</i>
C.	Évaluation des expositions.....	32
1.	<i>Estimation de la durée d'exposition vie entière chez les sapeurs-pompiers de Paris.....</i>	<i>32</i>
2.	<i>Concentrations en polluant mesurées dans le cadre des essais.....</i>	<i>32</i>
D.	Caractérisation des risques.....	34
1.	<i>Caractérisation des risques pour les effets aigus avec seuil.....</i>	<i>34</i>
2.	<i>Caractérisation des risques pour les effets chroniques avec seuil.....</i>	<i>36</i>
3.	<i>Caractérisation des risques pour les effets sans seuil.....</i>	<i>38</i>
V.	Discussion.....	43
A.	Synthèse des résultats.....	43
B.	Limites de l'étude.....	44
C.	Préconisations.....	46
VI.	Conclusion.....	49
VII.	Bibliographie.....	50
VIII.	Liste des tableaux et figures.....	52

I. Introduction

La lutte contre les incendies présente de nombreux risques auxquels les sapeurs-pompiers sont confrontés tout au long de leur carrière. Le premier concerne le développement visible du feu, à travers ses flammes que le sapeur-pompier apprend à domestiquer pour s'en protéger et le combattre. Un autre risque est désormais au cœur des préoccupations de ces techniciens : la toxicité des fumées d'incendie.

Les sapeurs-pompiers sont exposés aux gaz et fumées liés à la combustion des matériaux. Il s'agit d'une exposition complexe, composée de particules solides, de gaz et d'aérosols, pouvant différer en fonction de la nature des matériaux en combustion. Ce mélange de plus de 200 composés peut se révéler toxique pour les sapeurs-pompiers de manière immédiate, mais également dans le cadre d'une exposition chronique avec des effets à long terme.

De nombreuses études épidémiologiques se sont penchées sur les conséquences potentielles de cette exposition. Une association possible entre cette exposition et le développement de cancers a ainsi été établie en 2010 par le CIRC (1).

En France, la publication d'un rapport de la CNRACL (2) en 2017 et d'une doctrine de la DGSCGC en 2018 (3) ont mis en évidence l'importance de cette exposition et la nécessité de mettre en place des mesures afin d'en diminuer les effets.

Afin d'améliorer l'efficacité de son mode opératoire et protéger ses personnels face à la survenue d'accidents ou de phénomènes thermiques, la brigade de sapeurs-pompiers de paris (BSPP), *via* son bureau d'étude et prospective (BEP), développe actuellement un nouveau moyen d'extinction par brumisation diphasique en s'appuyant sur un procédé de fragmentation hydropneumatique à basse pression de l'eau capable d'éteindre un feu en milieu clos comme ouvert.

Ce moyen d'extinction permet d'allier une technique performante en terme de refroidissement avec une rapidité d'exécution et une faible consommation d'eau. La BSPP désire ainsi améliorer la protection de ses personnels face au risque premier : le rayonnement.

Cependant, cette étude ne peut ignorer l'existence d'un second risque lié aux fumées et dans le respect des principes généraux de prévention (article R 4123-53 du code de la défense) elle doit s'assurer que ce nouveau moyen d'extinction est moins dangereux que la technique préexistante.

Un tel procédé de brumisation n'est pas employé à ce jour par d'autres services d'incendie et de secours. Il n'existe donc pas d'étude liée à l'impact de cette technique sur l'exposition des sapeurs-pompiers aux polluants atmosphériques. L'utilisation de la brumisation sur des chantiers pour sa capacité d'absorption des particules en suspension (désamiantage, traitements des déchets, démolition...), nous permet malgré tout d'envisager un effet bénéfique sur l'atmosphère viciée d'un incendie.

Dans quelle mesure l'utilisation, dans la lutte contre les feux de contenants, d'un brouillard d'eau obtenu par fragmentation hydropneumatique, peut-elle diminuer l'impact sanitaire lié à l'exposition des sapeurs-pompiers de Paris aux polluants atmosphériques, par inhalation en phase « post-extinction » ?

Afin de répondre à cette problématique, une série d'essais a été réalisée en collaboration avec le laboratoire central de la préfecture de police (LCP). Elle consiste à comparer les expositions aux polluants gazeux et particulaires lors de l'emploi de moyens d'extinctions traditionnels *versus* l'emploi de la brumisation.

Les mesures effectuées par le LCP se concentrent sur les principaux composés organiques volatils, dont le **benzène** et le **formaldéhyde**, **12 hydrocarbures aromatiques polycycliques**, dont le

benzo(a)pyrène ainsi que le **monoxyde de carbone** et la **fraction inhalable des particules en suspension**.

Ces mesures sont effectuées lors des phases « **post-extinction** », c'est-à-dire au cours des opérations de déblai menées à l'issue des phases de lutte active contre l'incendie. Un rapport de l'ANSES d'août 2019 (4) sur les différentes expositions professionnelles des sapeurs-pompiers, déclare en effet que le port des appareils de protection respiratoire est très hétérogène lors de cette phase.

L'impact sanitaire est déterminé ici à travers une approche d'évaluation quantitative du risque sanitaire (EQRS), ayant pour but d'utiliser l'ensemble des connaissances disponibles pour réduire l'incertitude et éclairer la prise de décision. Cette EQRS vise à quantifier l'impact sanitaire associé aux substances toxiques mesurées, avec des effets aigus et chroniques dont la survenue de cancers.

Enfin, l'ensemble des résultats obtenus ainsi que les limites de cette approche quantitative sont discutés. Différentes mesures de prévention sont également listées afin de limiter l'exposition des sapeurs-pompiers de Paris.

II. Contexte

A. Présentation de la BSPP

La brigade de sapeurs-pompiers de paris (BSPP) est aujourd'hui le troisième corps de sapeurs-pompiers au monde après ceux de New York et Tokyo. Créée le 18 septembre 1811 par Napoléon I^{er} suite à l'incendie de l'ambassade d'Autriche, la BSPP est actuellement compétente sur Paris et les 123 communes de la petite couronne (Hauts-de-Seine, Seine-Saint-Denis et le Val-de-Marne).

Fruit de son histoire bicentenaire, la BSPP est une unité de l'armée de Terre, placée pour emploi sous l'autorité du préfet de Police de Paris. Ce service interdépartemental d'incendie et de secours est chargé de la prévention, de la protection et de la lutte contre les incendies sur son secteur de compétence. Elle concourt également à la protection et à la lutte contre les autres accidents, sinistres et catastrophes, ainsi qu'à l'évaluation et à la prévention des risques.

Le territoire de compétence de cette unité est unique en France et fait de ces militaires des pompiers de mégapole. Sur une superficie de 760 km², se concentre une population de 7 millions d'habitants à laquelle viennent s'ajouter 2 millions de franciliens et 10 millions de personnes en transit. Il s'agit également du siège des pouvoirs exécutif, législatif, judiciaire et économique du pays, mais également de la manifestation sociale.

En 2018, les 8 500 militaires de la BSPP ont ainsi effectué plus de 522 000 interventions, soit environ une intervention toutes les minutes. Le secours à victimes représente 81 % de ces interventions, contre à peine 3 % en ce qui concerne l'incendie.

Cette organisation interdépartementale repose sur 71 bases opérationnelles où près de 2000 militaires sont en permanence de garde ou d'astreinte.

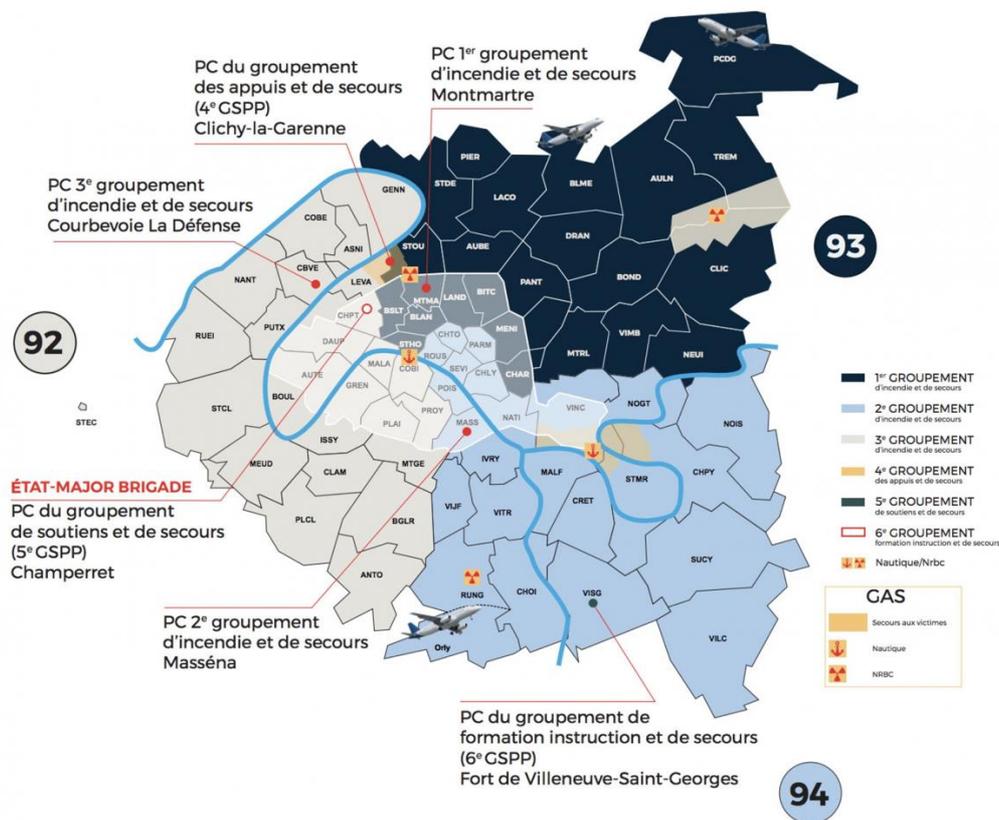


Figure 1 : organisation territoriale de la BSPP.

B. La toxicité des fumées chez les sapeurs-pompiers

Si le danger des flammes a été pris en compte depuis de nombreuses décennies, les sapeurs-pompiers sont sensibilisés depuis peu de temps sur les risques que peut présenter l'exposition aux fumées d'incendie.

De nombreuses études épidémiologiques ont pu démontrer les conséquences sur la santé des expositions aux fumées d'incendie chez les sapeurs-pompiers. Ainsi en 2007, le centre international de recherche sur le cancer (CIRC) publie une revue documentaire sur l'incidence du cancer chez les sapeurs-pompiers (1), concluant en 2010 que la lutte contre l'incendie est probablement cancérigène pour l'Homme (Groupe 2B).

En France, la publication d'un rapport de la CNRACL et d'une doctrine de la DGSCGC en 2018, montre l'importance de la prise de conscience de ce risque dans la profession des sapeurs-pompiers (2,3).

Dans le cadre de cette étude, nous présentons les résultats d'une récente méta-analyse internationale et différentes études menées au sein de la BSPP.

1. Méta-analyse relative au risque de cancer parmi les sapeurs-pompiers

En janvier 2019, l'**International journal of Cancer** publie une revue systématique de la littérature et une méta-analyse sur le risque de cancer chez les sapeurs-pompiers (5).

Cette méta-analyse regroupe 48 études internationales publiées avant le 1^{er} janvier 2018 et permet d'évaluer le risque de cancer dans cette profession.

Les résultats sont exprimés en rapport de mortalité standardisé (RMS) ou rapport d'incidence standardisé (RIS), correspondant aux rapports entre le nombre observé et le nombre prévu (de décès pour le RMS et de nouveaux malades pour le RIS) par rapport à une population de référence.

Les résultats en termes d'**incidence** sont significativement supérieurs à 1, avec un intervalle de confiance à 95%, pour les cancers suivants :

- côlon : RIS de 1,14 (IC à 95% - 1,06 – 1,21),
- rectum : RIS de 1,09 (IC à 95% - 1,00 – 1,20),
- prostate : RIS de 1,15 (IC à 95% - 1,05 – 1,27),
- testicules : RIS de 1,34 (IC à 95% - 1,08 – 1,68),
- vessie : RIS de 1,12 (IC à 95% - 1,04 – 1,21),
- thyroïde : RIS de 1,22 (IC à 95% - 1,01 – 1,48),
- plèvre : RIS de 1,60 (IC à 95% - 1,09 – 2,34),
- mélanome malin : RIS de 1,21 (IC à 95% - 1,02 – 1,45).

On retrouve également une **mortalité** significativement plus élevée pour les cancers suivants :

- rectum : RMS de 1,36 (IC à 95% - 1,18 – 1,57),
- lymphome non hodgkinien : RMS de 1,42 (IC à 95% - 1,05 – 1,90).

Les résultats de cette méta-analyse exigent la mise en œuvre de mesures de prévention, d'une surveillance médicale adaptée et le lancement d'études plus précises sur l'exposition de cette population.

2. Les études liées à la toxicité des fumées à la BSPP

- **Analyse de la mortalité chez les sapeurs-pompiers de la BSPP (6) :**

Une cohorte de 830 sapeurs-pompiers de Paris a été suivie et comparée à la population générale. Ces individus devaient avoir servi au sein de l'institution depuis au moins 5 années au 1^{er} janvier 1977 et ils ont été suivis jusqu'au 1^{er} janvier 1991, soit durant 14 ans.

Une sous-mortalité générale est observée avec un RMS de 0,52 (IC 95% - 0,35 – 0,75) par rapport à la population générale masculine en France. Cela est expliqué par « l'effet du travailleur sain ».

On note tout de même une surmortalité significative pour les cancers génito-urinaires (RMS = 3,29), digestifs (RMS = 1,14), respiratoire (RMS = 1,12) et les maladies cérébrovasculaires (RME = 1,16).

- **Trois mémoires d'ingénieurs en sécurité sanitaire du CNAM au sein de la BSPP :**

Ces trois études s'intéressent à l'exposition des sapeurs-pompiers de Paris aux polluants atmosphériques dans le cadre des feux de contenants. Cette exposition est évaluée quantitativement au moyen de mesures expérimentales réalisées en collaboration avec le LCPP et à travers la mise en œuvre d'une matrice temporelle d'exposition pour les effets à long terme.

La première étude établit un quotient de danger (QD) largement supérieur à 1 en ce qui concerne l'exposition aiguë des sapeurs-pompiers au monoxyde de carbone. La survenue d'effet sur la santé lié à une exposition chronique à des produits cancérigènes est exclue dans le cadre de cette étude (7).

Dans la deuxième étude, le résultat lié à l'exposition chronique des sapeurs-pompiers de Paris aux polluants atmosphériques en phase post extinction est un excès de risque individuel (ERI) de cancer de $1,4E-4$, occasionnant un excès de risque collectif (ERC) équivalent à 7 cancers attendus en excès au sein de la BSPP. Cet excès de risque impose une action en termes de gestion du risque au sein de cette organisation (8).

La troisième étude considère que cette exposition chronique occasionne un ERC de 0,18 pour les 4 800 sapeurs-pompiers en service d'incendie et de secours. En d'autres termes, le nombre de cas de cancers pouvant être attribués à cette exposition au cours de la vie de ces 4 800 sapeurs-pompiers est de 0,18 cas. L'objet de cette étude est également de comparer cette exposition avec l'emploi d'une attaque d'atténuation (méthode d'extinction menée depuis l'extérieur) : le résultat de cette comparaison est une diminution générale du risque de l'ordre de 30 %. Cette étude fait l'objet d'une publication au sein des archives des maladies professionnelles et de l'environnement (9).

C. L'emploi du brouillard d'eau

1. La lutte contre l'incendie par brouillard d'eau

Un brouillard est constitué de fines gouttelettes d'eau qui se développent dans l'espace en créant un milieu contenant un mélange d'air et d'eau. Ce milieu devient rapidement homogène et s'étend dans l'air.

La taille des gouttelettes est une caractéristique essentielle dans le cadre de l'extinction d'un incendie. Un brouillard d'eau est un spray dans lequel l'ensemble de l'eau émise est transformée en gouttelettes d'un diamètre inférieur à 1000 microns.

La figure 2 présente la nomenclature adoptée pour qualifier les jets issus de systèmes d'aspersion d'eau suivant la taille des gouttes.

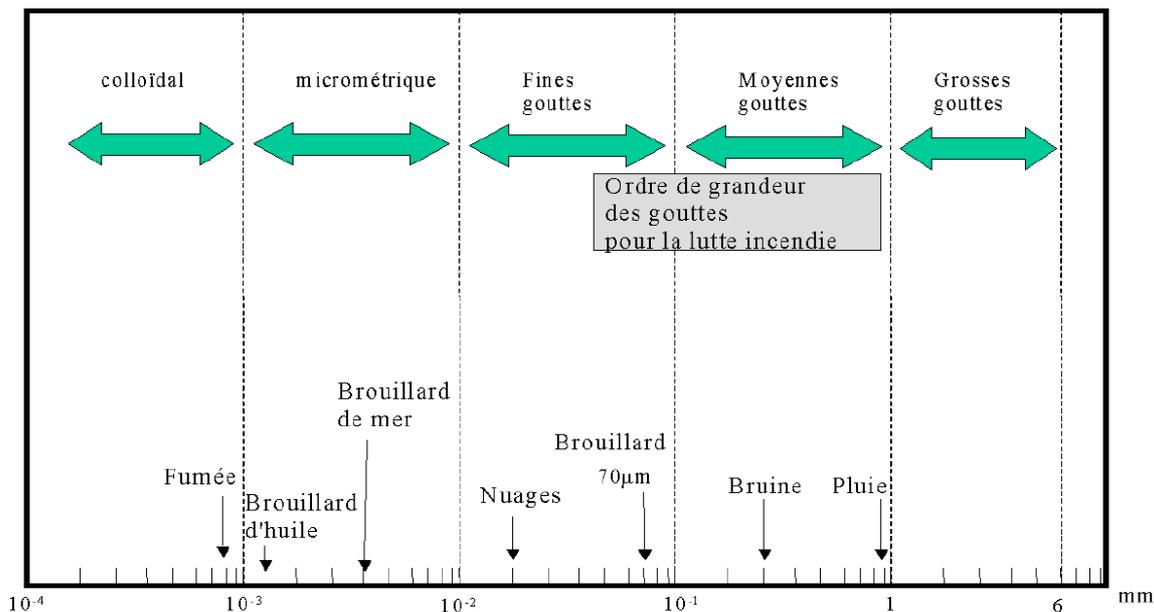


Figure 2 : nomenclature des différents types de jets dépendant de leur taille de gouttes caractéristique.

L'eau demeurant un agent extincteur très efficace, son emploi est privilégié dans la lutte contre l'incendie. L'eau est ainsi projetée sur le feu au moyen de lances, ou pulvérisée avec les installations fixes de type sprinklers traditionnels. Des installations fixes plus récentes utilisent des pulvérisateurs de brouillard d'eau.

La pulvérisation de brouillard d'eau est principalement utilisée dans le milieu industriel pour la protection incendie de bâtiment de stockage de produits dangereux ou de matériels sensibles et également dans le cadre de la protection incendie de certains tunnels de grande longueur.

La principale action d'un brouillard d'eau sur un incendie est l'absorption de chaleur et donc d'énergie pour transformer les gouttelettes en vapeur d'eau. Cette absorption d'énergie est d'autant plus efficace que les surfaces d'échanges thermiques sont importantes dans un brouillard pour une très faible quantité d'eau émise. A titre d'exemple, un litre d'eau divisé en gouttelettes de 1 mm de diamètre occasionne une surface d'échange avec le milieu de 6 m², alors que cette même quantité d'eau divisée en gouttelettes de 30 µm permet d'obtenir une surface d'échange de 200 m².

La production de vapeur occasionne une seconde action sur le sinistre : l'inertage. La vapeur d'eau prenant environ 1500 fois plus de place que l'eau liquide, elle écarte l'air et appauvrit le milieu en oxygène, provoquant l'extinction du feu.

La recherche sur l'extinction des feux à l'aide d'un brouillard d'eau est riche et permet de constater qu'il s'agit d'un moyen d'extinction efficace, caractérisé par une faible consommation d'eau en comparaison des techniques conventionnelles (10,11).

Le brouillard d'eau est utilisé en tant qu'agent extincteur par les sapeurs-pompiers depuis une vingtaine d'années dans le cadre de lances perforantes. Cette lance, développée par l'Agence des Services de Secours Suédois, permet de produire du brouillard d'eau et de le projeter dans le compartiment en feu depuis l'extérieur. Cette lance utilise la haute pression pour obtenir cet effet perforant.

Ce moyen d'extinction perforant est actuellement employé à la BSPP pour des interventions spécifiques, mais son utilisation de manière générique impliquerait une remise en question totale sur le plan technique, tactique et opérationnel.

L'expérimentation à laquelle est rattachée cette étude concerne un moyen d'extinction capable de produire un brouillard d'eau basse pression, tout en conservant la méthode d'engagement traditionnelle de la BSPP : l'introduction d'une équipe protégée par appareils respiratoires dans le bâtiment concerné, dans le but de mener une attaque au plus près du sinistre.

Ce moyen d'extinction utilise la fragmentation hydropneumatique. De l'air comprimé est mis en contact avec la veine d'eau à la sortie de la buse, occasionnant l'atomisation de l'eau et la formation d'un brouillard très fin. La pression de cette veine d'eau est de l'ordre de 6 bars à l'entrée du dispositif de fragmentation.

2. L'impact d'un brouillard d'eau sur les fumées d'incendie

L'abattage des poussières par brumisation est utilisé et recommandé dans de nombreuses filières telles que le traitement de déchets, les chantiers de travaux publics, le désamiantage... Il s'agit de traiter un air chargé de poussières de très faible granulométrie au moyen d'un brouillard composé de gouttes d'eau très fines. Les poussières sont attirées par les particules d'eau et une fois hydratées, s'alourdissent et tombent. On peut donc supposer que les brouillards d'eau vont avoir un impact sur la composition des fumées d'incendie à la suite de l'extinction.

Cependant, alors que la littérature scientifique est facilement accessible en ce qui concerne la capacité d'extinction des feux au moyen de brouillards d'eau, il est en revanche plus difficile de trouver des études sur l'impact de ce moyen d'extinction sur les fumées et sur l'exposition des sapeurs-pompier.

Deux études françaises présentées ci-dessous permettent d'observer une certaine capacité de captation des gaz hydrosolubles présents dans les fumées d'incendie, ainsi que le lessivage des suies et particules en suspension, occasionnant leur précipitation au sol. Ces deux études ne proposent toutefois pas d'évaluation quantitative de cet impact éventuel sur les fumées d'incendie.

- Essais LCPP relatifs à l'emploi d'un brouillard d'eau dans la lutte contre l'incendie (sept 2008) (12) :

Cette expérimentation consiste à évaluer un dispositif de protection par brouillard d'eau dans différentes dispositions au sein d'un immeuble d'habitation.

Les concentrations de certains gaz de combustion émis sont mesurées (CO, CO₂, NO) et des bacs de récupération sont installés au sol afin d'évaluer la précipitation des particules et suies liés à l'utilisation d'un brouillard d'eau.

Il est observé une certaine efficacité dans la captation des gaz hydrosolubles, ainsi que pour les suies et particules diverses. En revanche, les gaz peu ou pas solubles tel que le CO semblent être peu captés, mais se retrouvent dispersés par le brouillard d'eau, occasionnant une diminution des concentrations locales.

- Les brouillards d'eau dans les tunnels routiers - Centre d'études des tunnels (juin 2010) (13) :

Dans le cadre d'une sécurisation accrue des tunnels routiers face au risque d'incendie et pour faire suite aux dramatiques incendies des tunnels du Mont Blanc et de Fréjus, le centre d'études des tunnels (CETU) s'intéresse à la mise en œuvre d'un système fixe de lutte contre l'incendie et, plus spécifiquement, ceux produisant un brouillard d'eau. Afin de permettre une auto-évacuation du public présent dans un tunnel routier, l'impact potentiel du brouillard d'eau sur la toxicité des fumées est important.

Le rapport explique que certains gaz, possédant des propriétés chimiques qui les rendent très peu solubles dans l'eau, ne sont pas dissous par le brouillard d'eau. Il s'agit du dioxyde de carbone (CO₂),

du monoxyde de carbone (CO), ou d'oxydes d'azote (NO_x). En revanche, d'autres gaz toxiques comme le chlorure d'hydrogène (HCl) ou le dioxyde de soufre (SO₂), qui sont eux très solubles dans l'eau, vont être dissous. Le pH de l'ordre de 2 mesuré sur la chaussée après extinction est une preuve de cette dissolution.

Ce rapport fait également référence à un éventuel lessivage des suies présentes dans les fumées d'incendie par le brouillard d'eau.

En l'état actuel des connaissances et des techniques de mesures disponibles, ces deux phénomènes de dissolution des gaz et de lessivage des suies, demeurent difficilement quantifiables dans les conditions de température et de pression liées à un incendie.

D. Contexte spécifique à la BSPP

Les évolutions des matériaux employés, des techniques de construction et d'isolation des nouveaux bâtiments, augmentent considérablement le risque de survenue d'accidents ou de phénomènes thermiques, principalement dans le cadre de feux sous ventilés.

Depuis une vingtaine d'années, les militaires de la BSPP recensent de nombreux accidents de ce type, dont certains ont eu un dénouement tragique, leur rappelant l'enjeu de leur engagement.

La BSPP cherche donc à améliorer de manière continue ses techniques d'engagement afin de réduire ce risque. La mise en œuvre de l'attaque d'atténuation (par l'extérieur), ainsi que l'emploi de la lance perforante, sont par exemple deux concepts tactiques permettant d'éloigner le sapeur-pompier du risque principal, et donc de diminuer son exposition.

La campagne d'essais réalisée par la BSPP en collaboration avec le LCPP sur l'emploi **d'un moyen d'extinction produisant un brouillard d'eau** rentre dans ce cadre prospectif.

Tout en conservant une conception tactique traditionnelle, qui vise à mener une extinction en investissant les locaux sinistrés par l'intérieur, le premier objectif est d'améliorer l'efficacité du moyen d'extinction employé par les portes-lances et de s'assurer qu'il soit en mesure de les protéger contre la survenue d'un accident ou d'un phénomène thermique.

Le second objectif est de disposer d'un moyen d'extinction rapide à mettre en œuvre, particulièrement dans des conditions difficiles (par exemple en étages), afin de limiter la période de vulnérabilité des sapeurs-pompiers, c'est-à-dire la durée durant laquelle ils ne disposent pas d'un moyen d'extinction en mesure de les protéger.

A travers l'efficacité de l'absorption thermique d'un brouillard d'eau et l'emploi d'une technologie simple à mettre en œuvre (eau et air basses pressions – faible débit), la brumisation pourrait répondre à ce double enjeu.

En parallèle, la BSPP a pris en compte depuis plusieurs années les risques associés à l'exposition de ses militaires aux fumées d'incendie. A travers des mesures d'expositions et la mise en œuvre de protocoles de décontamination post-extinction, la BSPP cherche à évaluer ces risques et à réduire les expositions.

Dans le cadre d'une politique intégrée de Santé et de Sécurité au Travail, toute expérimentation relative à une modification technique ou tactique dans la lutte contre un incendie doit évaluer l'impact de cette évolution sur l'exposition des sapeurs-pompiers aux fumées d'incendie.

L'intégration de cette étude au sein d'une campagne d'essais générale sur la mise en œuvre de la brumisation a donc pour objectif de s'assurer que ce potentiel moyen d'extinction n'ait pas un impact négatif sur l'exposition des sapeurs-pompiers aux fumées d'incendie, et éventuellement d'évaluer une diminution de ce risque.

III. Méthodes

A. La méthode EQRS

L'évaluation quantitative du risque sanitaire (EQRS) a été formalisée en 1983 par le national research council (NRC) des États-Unis. Il s'agit d'une démarche prédictive visant, selon la définition classiquement énoncée, « à utiliser des 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. » La place d'un jugement fondé sur des convictions est ainsi réduite autant que possible.

Elle est devenue aujourd'hui une méthode de référence dans le domaine de la gestion des risques dans le cadre, par exemple, d'études d'impacts pour les demandes d'autorisation d'exploitation ou de production de substances chimiques. Elle permet de disposer d'un cadre méthodologique permettant de rassembler, organiser, discuter des résultats scientifiques et éclairer ainsi les décisions politiques et la mise en place de stratégies de gestion du risque.

Dans cette partie nous précisons la méthodologie en quatre étapes appliquée dans le cadre d'une EQRS, en s'inspirant de la description proposée dans le rapport de l'InVS et de l'Afsset (14). La sélection de cette méthode dans le cadre de cette étude, est également expliquée.

1. Structure de la démarche d'EQRS

1^{ère} étape : l'identification des dangers

Les substances ou agents dangereux sont répertoriés dans cette étape. Pour chacun d'entre eux les potentiels effets sanitaires indésirables sont recherchés.

Une éventuelle sélection peut être effectuée en s'appuyant sur un certain nombre de critères tels que la quantité de substances rejetées, des effets indésirables spécifiques, la nature et la preuve des données toxicologiques (animales ou humaines).

2^{ème} étape : la sélection des valeurs toxicologiques de référence (VTR)

Cette étape permet d'estimer le risque en fonction de la dose au moyen des VTR. Ces valeurs sont obtenues à partir de la relation dose-effet et traduisent donc le lien entre la dose de la substance toxique et l'occurrence ou la sévérité de l'effet étudié dans la population. Les VTR sont donc spécifiques d'un effet (généralement l'effet critique, le premier à se manifester après exposition), d'une durée d'exposition (aigüe ou chronique) et d'une voie d'exposition.

En fonction de l'effet critique considéré, deux approches existent :

- une approche déterministe lorsqu'il s'agit d'effets avec seuil de dose : la VTR correspond alors à la dose en dessous de laquelle l'effet néfaste n'apparaît pas. En dessous de ce seuil de dose la population est considérée comme protégée,
- une approche probabiliste lorsqu'il s'agit d'effets sans seuil de dose : la VTR est alors un excès de risque unitaire (ERU) de cancer. L'approche probabiliste consiste à considérer qu'il existe un risque, infime mais non nul, qu'une seule molécule pénétrant dans le corps provoque des changements dans une cellule à l'origine d'une lignée cancéreuse. Pour la voie d'exposition par inhalation l'ERU représente la probabilité individuelle de développer un cancer suite à une exposition à une concentration de produit toxique de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dans l'air inhalé par un sujet pendant toute sa vie.

Dans cette étape une sélection de VTR est effectuée pour chaque substance et pour chaque type d'exposition. Les critères pris en compte peuvent être la notoriété de l'organisme ayant élaboré la VTR,

l'origine des données (humaines ou animales), la cohérence sur la voie d'exposition et celle sur la durée de l'étude source par rapport à la situation étudiée.

3^{ème} étape : l'estimation de l'exposition

L'objectif est de déterminer la dose de polluant qui arrive au contact ou qui pénètre dans l'organisme. En fonction de la nature du polluant cette estimation peut s'effectuer pour chaque voie d'exposition ou bien de manière combinée.

Les paramètres clés de cette estimation sont la fréquence, la durée et l'intensité des contacts entre la population et la substance. L'intensité des contacts correspond à la concentration de la substance dangereuse dans le milieu étudié.

Afin d'obtenir cette estimation la meilleure méthode consiste à effectuer des mesures directement sur les personnes. Devant l'impossibilité d'obtenir ces mesures les doses de polluants auxquelles sont exposées les populations sont obtenues en établissant des scénarios d'exposition.

4^{ème} étape : la caractérisation du risque

En combinant les informations issues des trois étapes précédentes il est possible de caractériser le risque.

Le risque est quantifié pour les substances dangereuses pour lesquelles une VTR est disponible et pour lesquelles une exposition a été déterminée.

Pour les effets survenant à partir d'un seuil le résultat est exprimé sous forme d'un quotient de danger (QD). Pour les effets sans seuil le résultat est apprécié sous la forme d'un excès de risque individuel (ERI).

L'analyse de l'ensemble de ces éléments constitue **l'impact sanitaire**.

2. Pertinence de la méthode dans le cadre de cette étude

Dans le cadre de cette étude l'utilisation d'une EQRS répond à la nécessité d'éclairer le commandement de la BSPP sur les risques ou les bénéfices de la mise en œuvre de la brumisation diphasique dans le cadre de l'exposition de ses militaires aux fumées d'incendie.

Elle répond au besoin de rassembler et organiser les résultats scientifiques dans le but d'estimer quel impact sanitaire peut être attendu.

B. Identification des dangers

De nombreuses études et ouvrages existent sur les fumées d'incendie et leur dangerosité. Ces différents documents précisent la nature de cet « effluent du feu » et sa composition.

Afin de définir cette source de danger cette étude s'appuie sur la synthèse bibliographique intitulée « *Effets du feu sur les personnes* » (15) et sur l'ouvrage « *Autopsie d'une meurtrière* » (16) reprenant tous deux les principaux travaux de recherche liés aux fumées d'incendie.

Une définition simple de la fumée issue d'une norme ISO (17) est la suivante : « *l'ensemble des gaz et des aérosols, y compris les particules en suspension, créés par la combustion ou la pyrolyse d'un feu* ».

La fumée est donc le fruit de deux dégradations de la matière que l'on retrouve sur un incendie : les processus de pyrolyse et de combustion. Ces deux réactions vont produire de nouveaux éléments sous forme de composés solides, liquides et gazeux.

La composition précise de cet effluent est particulièrement difficile à définir. En effet, les composés présents dépendent de la nature du combustible, de la ventilation et de la chaleur de la réaction. On

dénombré ainsi dans la littérature scientifique **plus de 200 produits de décomposition pouvant être retrouvés dans les fumées d'incendie.**

Ce cocktail de composés chimiques évolue avec l'apparition de nouvelles technologies. C'est le cas avec l'utilisation de retardateurs de flamme dans l'ameublement domestique par exemple. Ce traitement occasionne une augmentation de la production de particules de suie liée à une combustion incomplète et ralentie. Cela se caractérise également par la présence de dérivés halogénés et phosphorés (18).

La plupart de ces composés sont toxiques. Il s'agit de substances irritantes, asphyxiantes ou narcotiques. Les principaux composés à prendre en compte sont :

- le monoxyde de carbone (CO),
- le dioxyde de carbone (CO₂),
- le cyanure d'hydrogène (HCN),
- les composés chlorés et bromés (acide chlorhydrique, phosgène...),
- les produits soufrés (dioxyde de soufre, sulfure d'hydrogène...),
- les oxydes d'azote (monoxyde d'azote...),
- les composés organiques volatils ou COV (benzène, formaldéhyde, acétaldéhyde...),
- l'ammoniac (NH₃),
- les hydrocarbures (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques...),
- les particules (PM 10, PM 2,5...).

En fonction de la substance toxique étudiée différentes voies d'absorption peuvent exister : par inhalation, par voie orale (ingestion) et par voie cutanée ou oculaire.

Les sapeurs-pompiers peuvent être exposés à travers ces différentes voies :

- par **inhalation** lorsqu'ils ne sont pas porteurs de leurs équipements de protection des voies respiratoires sur les lieux de l'incendie. **Cette voie d'exposition est prédominante** et existe également au-delà du lieu du sinistre lorsque leurs tenues non décontaminées vont libérer des polluants atmosphériques par désorption,
- par **ingestion** lors des phases de repos faisant suite à une opération d'extinction : en s'hydratant et en se restaurant,
- par **voie cutanée ou oculaire** avec des facteurs aggravants tels que la température élevée et une sudation excessive dans les équipements de protection.

Pour chacune des substances différents effets toxiques peuvent être attendus : une toxicité aiguë, une toxicité chronique (ou sub-chronique) et des effets génotoxiques, cancérigènes ou reprotoxiques. Certains de ces effets peuvent être à seuil de dose (relation entre une dose et un effet) et d'autres peuvent être sans seuil de dose (relation entre une dose et une probabilité d'apparition d'un effet).

En ce qui concerne les effets cancérigènes le CIRC classe les différentes substances en 5 groupes selon leur cancérogénicité pour l'être humain :

- Groupe 1 : agents cancérogènes (avérés ou certains),
- Groupe 2A : agents probablement cancérogènes,
- Groupe 2B : agents peut être cancérogènes (cancérogènes possible),
- Groupe 3 : agents inclassables quant à sa cancérogénicité,
- Groupe 4 : agents probablement non cancérogènes.

Dans le cadre de cette étude, l'identification des dangers (EQRS – 1^{ère} étape) consiste donc à déterminer les substances toxiques retenues en précisant la ou les voies d'expositions concernées et les effets toxiques associés.

C. Estimation de l'exposition

Dans le cadre de cette étude l'exposition aux différents agents pathogènes n'est pas mesurée directement sur les sapeurs-pompiers engagés. Elle est mesurée à partir d'un point de mesure fixe sur une scène d'incendie selon les conditions définies dans la partie D. *Protocole expérimental*.

L'estimation de l'exposition des sapeurs-pompiers de Paris aux fumées d'incendie nécessite donc la mise en place d'un scénario d'exposition.

1. Définition du scénario d'exposition

Le scénario d'exposition définit la phase temporelle durant laquelle ces mesures doivent être prises en compte. **La phase étudiée correspond à la phase post-extinction.**

En effet le règlement sur l'organisation et le fonctionnement du service d'incendie et de secours (ROFSIS) (19) décompose la doctrine employée par les sapeurs-pompiers de Paris dans la lutte contre l'incendie en deux phases principales.

Une première dite de « lutte active » comprenant entre autres l'attaque et l'extinction du sinistre. La seconde, dite « post-extinction », débute lorsque l'incendie est éteint. Durant cette seconde phase les sapeurs-pompiers effectuent des opérations de déblais des matériaux incendiés, de dégarnissage des parties sinistrées, de recherche d'éventuels foyers secondaires ou de points chauds et de sécurisation des lieux.

Durant cette phase le ROFSIS impose aux sapeurs-pompiers de Paris « *le port obligatoire de l'appareil respiratoire isolant (ARI) tant que le contrôle de la teneur en monoxyde de carbone n'a pas été effectué par le commandant des opérations de secours (COS) et que des fumées subsistent* » (19). Cette nécessité de protection des voies respiratoires, cutanée et oculaire au-delà de la phase d'attaque est également rappelé dans guide de doctrine de la DGSCGC (3).

Malgré ces exigences réglementaires, il est constaté que les sapeurs-pompiers retirent dans la majeure partie des cas leurs protections respiratoires. Cela peut s'expliquer par la fatigue associée à une première phase active de lutte contre l'incendie, le poids et l'encombrement des ARI, le manque d'ergonomie ou encore par le manque d'autonomie des réserves d'air. Ce constat est fait dans de nombreuses publications françaises et étrangères dont le rapport de l'ANSES publié en août 2019 relatif aux expositions professionnelles des sapeurs-pompiers (4).

Cette absence de protection respiratoire en phase post-extinction est la principale cause d'exposition des sapeurs-pompiers de Paris aux fumées d'incendie.

2. Matrice d'exposition chez les sapeurs-pompiers de Paris

Pour les effets sans seuil de dose le calcul associé à l'étape de caractérisation du risque nécessite de déterminer **la durée d'exposition aux fumées d'incendie en phase post-extinction sur la vie entière des sapeurs-pompiers concernés.**

Devant l'impossibilité de recueillir cette information pour chacun des sapeurs-pompiers de Paris exposé une matrice d'exposition est construite.

Cette matrice d'exposition utilise les données fournies par le bureau organisation ressources humaines (BORH) et le bureau planification opérationnelle (BPO) de la BSPP.

Sur un effectif total d'environ 8 500 militaires la population étudiée comprend 4 375 personnels. Il s'agit de l'ensemble des sapeurs-pompiers de Paris affecté en service d'incendie et de secours (SIS) et pouvant être directement exposés aux fumées d'incendie. Le tableau 1 présente cette population répartie par grades et fournit pour chaque grade les caractéristiques d'âge et d'ancienneté.

Grade	Effectif en SIS	Age moyen (en années)	Ancienneté moyenne (en années)	Ancienneté moyenne dans le grade (en années)
Lieutenant	48	32	10,3	10,3
Adjudant-chef	24	43,3	22,3	3,5
Adjudant	71	39,6	18,8	3,9
Sergent-chef	105	35,5	14,9	4,6
Sergent	498	31,1	10,3	2,9
Caporal-chef	771	28,3	7,4	1,9
Caporal	897	26,7	5,5	2,3
Sapeur	1961	24,3	3,2	3,2

Tableau 1 : âges et anciennetés moyens par grades de la population étudiée (sources BORH - 2019)

La BSPP dispose d'un outil informatique de gestion des opérations. Cet outil permet d'obtenir un temps d'engagement opérationnel (TEO) pour chacun des personnels.

Ce TEO prend en compte l'ensemble des engagements effectués par le personnel sans distinguer la typologie de l'intervention. Il n'est donc pas possible d'obtenir un TEO sur incendie.

Cette information est obtenue en exploitant les données statistiques du BPO sur l'année 2018 (20) relatifs à la proportion et la durée moyenne des interventions en fonction de leur typologie (incendie, secours à victime, accidents...) Cette exploitation permet de définir que **3,7 %** du TEO global correspond au TEO sur incendie.

Afin de déterminer le TEO en phase post-extinction cette étude utilise l'analyse effectuée dans l'article de Julien VALDENNAIRE et al (9). Le découpage temporel d'une intervention de type incendie est effectué en analysant une centaine de mains courantes opérationnelles (MCO) dans le cadre d'un comité d'expert. Une MCO retransmet de manière précise et chronométrée l'ensemble des actions effectuées au cours d'une intervention. Le comité d'expert conclut que la phase post-extinction correspond à **57 %** du temps d'engagement des sapeurs-pompiers sur ce type d'intervention.

Le tableau 2 applique l'ensemble du raisonnement présenté ci-dessus afin de déterminer les TEO annuels en phase post-extinction par grade.

Grade	TEO annuel moyen global (en heures)	TEO annuel moyen sur incendie (en heures)	TEO annuel moyen en phase post-extinction (en heures)
Lieutenant	165	6,1	3,5
Adjudant-chef	136	5,0	2,9
Adjudant	163	6,0	3,4
Sergent-chef	193	7,1	4,1
Sergent	273	10,1	5,8
Caporal-chef	377	13,9	8,0
Caporal	288	10,7	6,1
Sapeur	278	10,3	5,9

Tableau 2 : Temps d'Engagements Opérationnels annuels par grade (sources BPO – année 2018)

D. Protocole expérimental

Les résultats utilisés dans le cadre de cette étude sont obtenus à partir d'une campagne de mesure réalisée par le LCPP en collaboration avec la BSPP (21).

L'objectif de ces mesures est d'évaluer l'efficacité de la brumisation sur l'émission de polluants gazeux et particulaires après incendie en comparant son action avec celle d'une lance traditionnelle.

1. Description du cadre expérimental

La campagne de mesure est effectuée les 19 et 20 mars 2019 sur un site de la BSPP au Fort de la Briche à Saint-Denis (93). Elle repose sur la reproduction de feux de contenant sous-ventilé dans une structure expérimentale.

La structure expérimentale est composée de caissons maritimes formant une configuration en L constituée d'un couloir de près de 9 m de long pour la progression des portes-lances, d'une zone tampon et enfin d'une zone foyer (figure 3).

Pour chacun des essais la configuration du foyer est identique : cinq palettes en bois et une plaque en mousse polyéther gabarisées.

La structure et le protocole mis en œuvre sont identiques à la première configuration expérimentale utilisée dans le cadre de l'étude pour la caractérisation de l'efficacité d'un moyen mobile d'extinction, résultat d'une collaboration entre le BSPP, le LCPP et le LEMTA (22) L'utilisation de cette configuration expérimentale permet de garantir une répétabilité suffisante du développement du feu.

L'extinction du foyer est obtenue avec l'engagement d'un binôme de sapeurs-pompiers expérimentés. Ce binôme progresse avec un moyen d'extinction (lance diphasique ou traditionnelle) dans la structure jusqu'à l'entrée de la zone tampon à partir de laquelle il mène l'extinction.

Le binôme cesse l'extinction lorsqu'il ne perçoit plus de matière en combustion. Le feu est considéré « éteint » lorsque les thermocouples localisés dans la partie foyer indiquent une température inférieure à 100 °C.

Lorsque le feu est déclaré « éteint » un binôme de sapeurs-pompiers effectue le déblai des décombres résiduels au niveau du foyer.

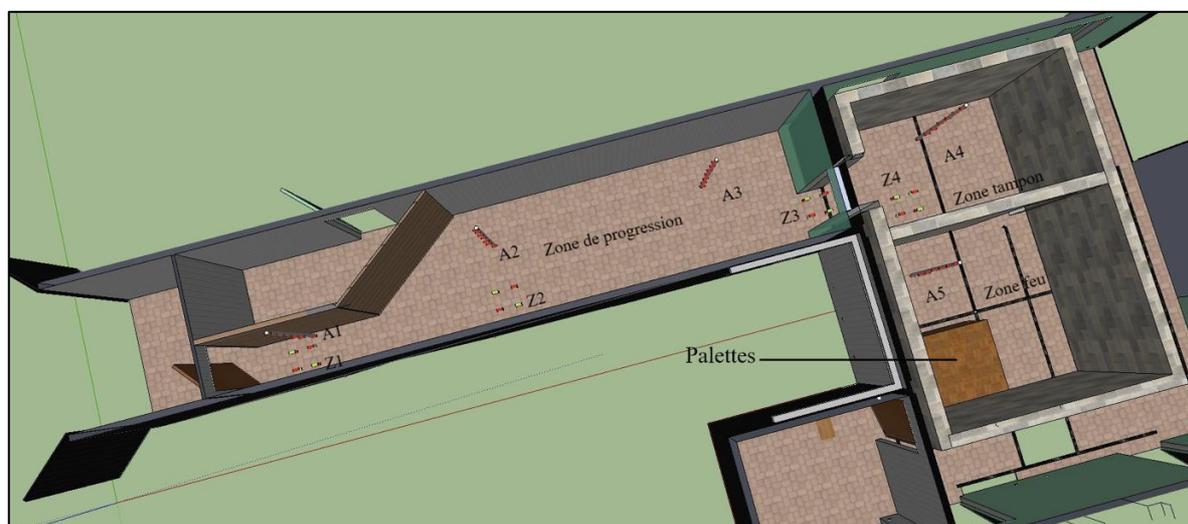


Figure 3 : vue schématique de la structure expérimentale.

2. Description des essais et de la stratégie d'échantillonnage

Quatre brûlages sont réalisés au cours de cette campagne. Deux avec une extinction menée au moyen d'une lance traditionnelle (lance à débit et jet variable employée à un débit de 500 l/min conformément à la doctrine appliquée à la BSPP) et deux avec une extinction menée au moyen d'une lance de brumisation diphasique.

Pour chaque essai deux séquences de mesures ont été réalisées :

- dans un premier temps, lors de la phase de déblai effectuée par le binôme de sapeurs-pompiers, sur une durée de 10 à 15 minutes,
- dans un second temps, à l'issue de la phase de déblai, sur une durée de 30 minutes.

Les mesures sont effectuées au niveau d'un point fixe localisé dans la zone de progression immédiatement en amont de la zone tampon.

Hormis la mesure de monoxyde de carbone effectuée au moyen d'un détecteur électrochimique, l'ensemble des mesures sont réalisées à travers des prélèvements par pompage sur tube à adsorption ou sur membrane filtrante.

Les méthodes employées dans le cadre de ces prélèvements sont décrites dans le tableau 3.

Substances	Principe de la méthode	Référence de la méthode
Composés organiques volatils (benzène, toluène, éthylbenzène, xylènes, 1,2,4-triméthylbenzène, styrène et naphthalène)	Prélèvement par pompage sur tube à adsorption - Désorption chimique du tube - Chromatographie en phase gazeuse et détecteur FID/SM	Méthode interne au LCPP (MOP0720 et MOP0294)
Aldéhydes (formaldéhyde et acétaldéhydes)	Prélèvement par pompage sur tube à adsorption - Désorption chimique du tube - Chromatographie liquide à haute performance et détection UV	NF ISO 16000-3
Hydrocarbures aromatiques polycycliques	Prélèvement par pompage sur résine XAD2 de la fraction gazeuse et sur filtre de la fraction particulaire - Désorption chimique des supports - Chromatographie liquide à haute performance et détection UV	Méthode interne au LCPP (MOP301)
Monoxyde de carbone	Détecteur électrochimique	-
Particules - Fraction inhalable	Prélèvement par pompage sur membrane filtrante - Détermination gravimétrique sur membrane filtrante	NF X 43-257

Tableau 3 : méthode de prélèvements des substances constituant les fumées d'incendie.

IV. Résultats

A. Identification des dangers

Les substances toxiques prises en compte dans cette étude correspondent aux principaux traceurs des phénomènes de combustion retenus par le département « Air et Mesures » du LCPP :

- **des Composés Organiques Volatils (COV)** : benzène, naphthalène, formaldéhyde, acétaldéhyde...
- **des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)** : douze HAP dont le benzo(a)pyrène,
- **le monoxyde de carbone,**
- **des particules** : la fraction inhalable.

Seule la voie d'exposition par inhalation est retenue dans le cadre de cette étude. Il s'agit de la voie d'exposition prédominante chez les sapeurs-pompiers lorsque ces derniers retirent leurs équipements de protection respiratoires.

Les effets toxiques recherchés sur ces composés sont :

- leurs **toxicités aiguës** dans le cadre d'une exposition maximale de courte durée,
- leurs **toxicités chroniques** (hors cancers) pour une exposition de plusieurs années,
- les **effets cancérigènes** du fait du classement de « la lutte contre l'incendie » comme probablement cancérigène pour l'Homme (Groupe 2B) par le CIRC.

1. Les Composés Organiques Volatils (COV)

Les COV sont des substances caractérisées par leur grande volatilité à température ambiante. Ces nombreux composés proviennent tous d'hydrocarbures et de leurs dérivés chimiques et sont donc composés à minima d'un élément Carbone.

Dans le cadre de cette étude, les composés retrouvés sont issus du processus de décomposition lié à la combustion de matériaux et plus particulièrement lorsque cette combustion est incomplète.

Les COV ont des effets très néfastes sur la santé (irritations des yeux et des voies respiratoires, troubles cardiaques et du système nerveux, céphalées, nausées...) et certains d'entre eux sont déclarés cancérigènes.

Le tableau 4 présente les dangers recensés pour les différents COV prélevés dans le cadre de cette étude, pour une exposition par inhalation.

Polluant	N° CAS	Toxicité aiguë	Toxicité chronique (hors cancers)	Effets cancérogènes	Source
Benzène	71-43-2	Symptômes neurologiques : céphalées et asthénie de 50 à 100 ppm, coma puis mort en 5 à 15 minutes à 20 000 ppm	Troubles psycho-organiques (irritabilité, dépression...) / troubles hématologiques non malins	Groupe 1 par le CIRC (hémopathies malignes et lymphopathies)	Fiche toxicologique n°49 INRS (23)
Toluène	108-88-3	Symptômes neurologiques : céphalées, asthénie, coma	Troubles psycho-organiques (irritabilité, dépression...)	Groupe 3 par le CIRC	Fiche toxicologique n°74 INRS (24)
Ethylbenzène	100-41-4	Dépression du système nerveux central (fatigue, ébriété, incoordination motrice) / irritation de la muqueuse nasale et du tractus respiratoire supérieur	Troubles psycho-organiques (irritabilité, dépression...) / irritation des voies respiratoires	Groupe 2B par le CIRC (tumeurs broncho-alvéolaires chez la souris et rénales chez le rat)	Fiche toxicologique n°266 INRS (25)
Xylène	95-47-6 108-38-3 106-42-3	Symptômes neurologiques : céphalées, asthénie, coma / irritation des voies respiratoires	Troubles psycho-organiques (irritabilité, dépression...)	Groupe 3 par le CIRC	Fiche toxicologique n°77 INRS (26)
1,2,4-triméthylbenzène	95-63-6	Dépression du système nerveux central (fatigue, ébriété, incoordination motrice) / irritation des voies respiratoires	Troubles psycho-organiques (irritabilité, dépression...) / troubles respiratoires type bronchite asthmatiforme	Absence de donnée	Fiche toxicologique n°223 INRS (27)
Styrène	100-42-5	Dépression du système nerveux central (fatigue, ébriété, incoordination motrice) / irritation des voies respiratoires	Troubles psycho-organiques (irritabilité, dépression...) / irritation des voies respiratoires	Groupe 2B par le CIRC (tumeurs pulmonaires chez la souris)	Fiche toxicologique n°2 INRS (28)
Naphtalène	91-20-3	Données insuffisantes chez l'homme	Données insuffisantes chez l'homme	Données insuffisantes chez l'homme	Fiche toxicologique n°204 INRS (29)
Formaldéhyde	50-00-0	Irritation sévère des voies respiratoires, œdème pulmonaire aiguë	Pathologie respiratoire chronique, irritation des voies respiratoires / Troubles psycho-organiques (irritabilité, dépression...)	Groupe 1 par le CIRC (cancers nasopharyngés, leucémies myéloïde, cancers naso-sinusiens)	Fiche toxicologique n°7 INRS (30)
Acétaldéhyde	75-07-0	Irritation des voies aériennes supérieures	Données insuffisantes chez l'homme	Données insuffisantes chez l'homme	Fiche toxicologique n°120 INRS (31)

Tableau 4 : identification des dangers pour les expositions aux COV par inhalation.

2. Les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)

Les HAP sont formés pendant la pyrolyse et la combustion des matériaux organiques et en quantité d'autant plus importante que la combustion est incomplète. Ils se forment dans la flamme par agrégation des noyaux atomiques libres.

Ces substances se présentent sous forme de mélanges divers de plus d'une centaine de composés différents variant selon le type de combustion et les matériaux concernés.

Devant la complexité de ces mélanges l'agence environnementale américaine (US-EPA) conseille de suivre une liste restreinte de 16 éléments prioritaires considérés comme les plus étudiés et les plus toxiques. Parmi cette liste le benzo(a)pyrène est régulièrement choisi comme molécule de référence du fait de sa cancérogénicité (groupe 1 par le CIRC).

Actuellement, les effets toxicologiques systématiques des HAP (effets aigus ou chroniques à seuil) relatifs à une exposition par inhalation sont imparfaitement connus. En prenant pour référence le benzo(a)pyrène, la fiche toxicologique de l'INRS (32) nous apprend qu'aucune donnée ne permet de déterminer l'existence d'effets aigus ou chroniques à seuil suite à une exposition par inhalation.

En revanche 15 HAP sont évalués cancérogènes avérés, probables ou peut-être cancérogènes par le CIRC. Les sites des tumeurs observées sont principalement les poumons, la vessie et les reins. On retrouve également des cancers pharyngés ou du larynx, de l'estomac, du pancréas et de la prostate.

Les mesures effectuées dans le cadre de cette étude concernent 12 HAP dont le benzo(a)pyrène. Le tableau 5 présente le classement du CIRC relatif aux effets cancérogènes pour chacune des substances étudiées.

Polluant	N° CAS	Classement CIRC
Phénanthrène	85-01-8	groupe 3
Anthracène	120-12-7	groupe 3
Fluoranthène	206-44-0	groupe 3
Pyrène	129-00-0	groupe 3
Benzo(a)anthracène	56-55-3	groupe 2B
Chrysène	218-01-9	groupe 2B
Benzo(b)fluoranthène	205-99-2	groupe 2B
Benzo(k)fluoranthène	207-08-9	groupe 2B
Benzo(a)pyrène	50-32-8	groupe 1
Dibenzo(a,h)anthracène	53-70-3	groupe 2A
Benzo(g,h,i)pérylène	191-24-2	groupe 3
Indéno(1,2,3-c,d)pyrène	193-39-5	groupe 2B

Tableau 5 : classement CIRC des 12 HAP mesurés.

3. Le monoxyde de carbone (CO)

Le monoxyde de carbone (33) est présent dans les fumées d'incendie en proportion variable. La formation de ce composé dépend du combustible et surtout des conditions de ventilation. Ainsi un feu de matières organiques en conditions sous-ventilées produit un taux considérable de monoxyde de carbone.

Cet élément est absorbé exclusivement par l'inhalation de fumées et l'intoxication intervient au niveau pulmonaire. Le CO est toxique par anoxie du fait de son affinité avec l'hémoglobine 200 fois plus élevée que le dioxygène.

L'intoxication aiguë se manifeste par une asthénie, des vertiges, des troubles de l'humeur et comportementaux. Ces troubles peuvent être associées à des céphalées. En cas d'intoxication massive on peut retrouver des symptômes de paralysie des membres ou de convulsions. En l'absence de traitement, ces symptômes peuvent aboutir au coma ou au décès rapide de la victime.

Le tableau de l'INRS (33) reprend les différents effets aigus du CO en fonction de son taux dans l'air (tableau 6).

Pourcentage volumique de CO dans l'air	Effets aigus
0,01 %	Céphalée
0,05 %	Vertige
0,1 %	Syncope
0,2 %	Coma, mort rapide
0,5 %	Mort immédiate

Tableau 6 : effets aigus du CO en fonction de son taux dans l'air.

Une intoxication chronique à ce gaz présente des signes proches d'une intoxication sub-aiguë débutante : céphalées, vertiges et asthénie. Cette intoxication répétée à de faibles doses pourrait également avoir un impact sur le système cardio-vasculaire à travers une ischémie myocardique chez des sujets ayant une coronaropathie préexistante.

Il n'y a pas de données sur les effets cancérogènes du monoxyde de carbone.

4. Les particules

On retrouve dans la fumée d'incendie une partie solide constituée de particules carbonées couramment appelées « suies » par les sapeurs-pompier.

Les suies sont formées à travers un processus extrêmement complexe de transformation de la matière au sein de la flamme décrit schématiquement dans la figure 4. Dans la zone la plus réactive et la plus chaude de la flamme, les molécules gazeuses de HAP se regroupent pour former les premières particules solides appelés nucléi. Dans la zone de la flamme puis dans les fumées les interactions avec de nouvelles substances gazeuses vont engendrer une croissance de ces nucléi pour former des particules primaires. Enfin dans des zones plus froides différents composants présents dans les fumées vont venir se fixer sur les particules primaires pour former des agrégats appelés « suies ».

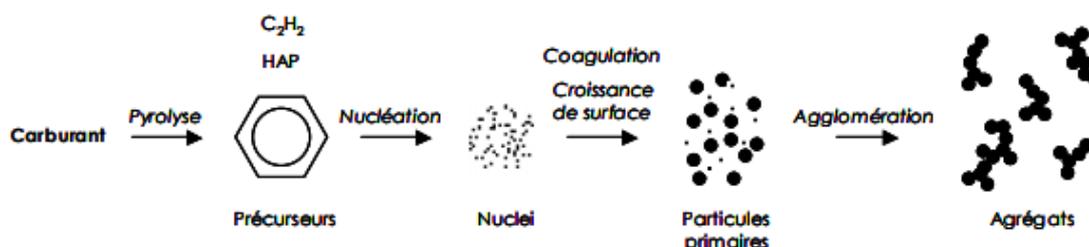


Figure 4 : processus de formation des particules de suies.

La particule primaire constitue donc le cœur de la particule de suie. Cet élément appelé « black carbon » ou « carbone suie » est le constituant principal des suies (50 à 70 %). Avec un diamètre de l'ordre 200 nanomètres ces particules appartiennent à la catégorie des PM 2,5 (particulates matters) c'est-à-dire les particules fines dont le diamètre est inférieur à 2,5 micromètres. La figure 5 nous donne l'ordre de grandeur de ces particules.

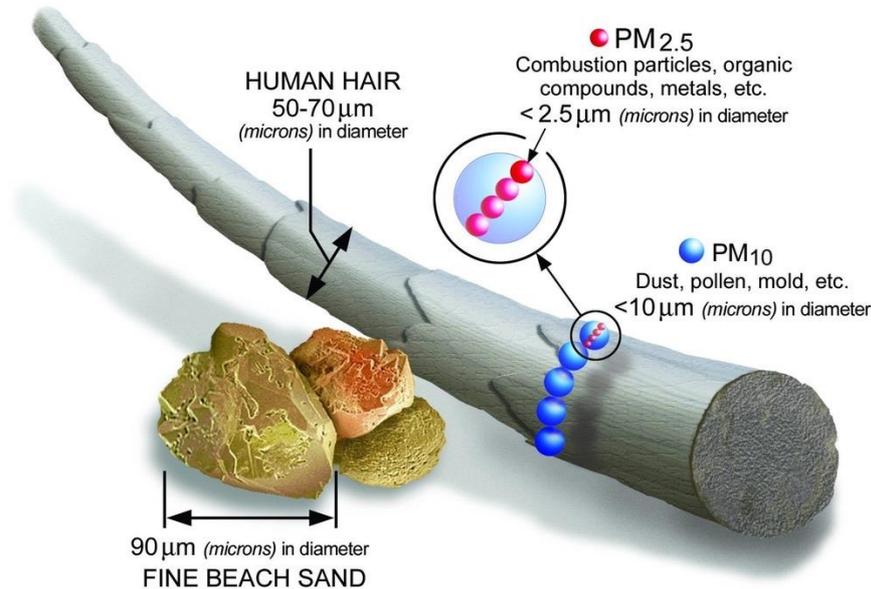


Figure 5 : schéma représentant l'ordre de grandeur des particules (source : US-EPA)

Avec une composition majoritairement carbonée les particules de suie peuvent être assimilées à du noir de carbone. La fiche toxicologique de l'INRS sur le noir de carbone (34) nous donne des éléments sur la toxicité de ces particules sur l'homme par inhalation :

- une intoxication aigüe peut provoquer une irritation des voies respiratoires,
- une exposition répétée ou prolongée, dite chronique, peut entraîner des symptômes respiratoires tels que des pneumoconioses ainsi que des pathologies cardiovasculaires,
- en 2006 le CIRC a classé le noir de carbone cancérigène possible (groupe 2B) en raison de données insuffisantes pour confirmer cette cancérigénicité chez l'homme (mais suffisantes chez l'animal). L'incidence des cancers des poumons est particulièrement surveillée.

En termes de cancérigénicité notons que le CIRC classe les particules en suspension dans l'air (liées à la pollution atmosphérique) ainsi que les particules issues des motorisations diesels cancérigènes avérés (groupe 1). Ces particules ont une composition comparable aux particules de suies issues d'un incendie.

Au-delà de leur composition complexe la toxicité des particules de suies par inhalation dépend de leur capacité à pénétrer profondément dans l'appareil respiratoire et à y persister du fait d'un processus d'élimination difficile.

En effet, les particules en fonction de leur taille peuvent avoir trois zones d'actions possibles : les voies respiratoires supérieures, l'arbre bronchial ou les sacs alvéolaires. Ainsi la nuisance et la profondeur de pénétration des particules croît à mesure que leur taille décroît.

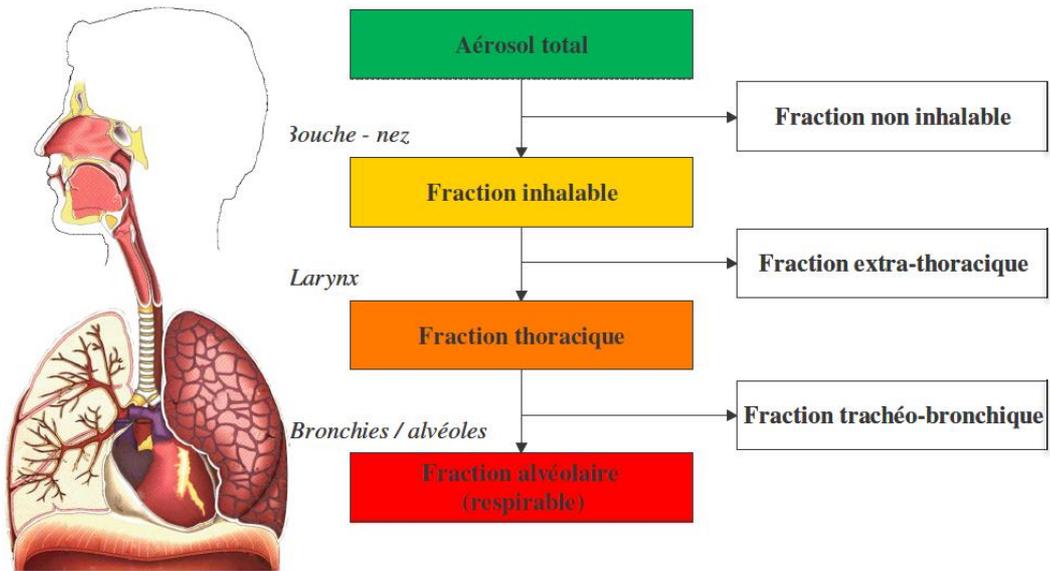


Figure 6 : définition des fractions de pénétration des particules.

Les particules les plus grosses, d'un diamètre supérieur à 10 micromètres, se déposent dans les conduits nasaux. Les particules de moins de 10 micromètres ne sont pas filtrées par les voies respiratoires supérieures (nez et bouche) et pénètrent donc les voies respiratoires inférieures. C'est ce qu'on appelle la fraction inhalable c'est-à-dire la fraction massique des particules totales en suspension dans l'air pouvant être inhalées par le nez et la bouche. Pour des diamètres de particules inférieurs on retrouve la fraction thoracique et la fraction alvéolaire (figure 6).

La figure 7 présente des courbes standardisées pour les différentes fractions de pénétration des particules. Ces courbes donnent la probabilité qu'une particule d'une taille donnée atteigne les différents niveaux de l'arbre respiratoire.

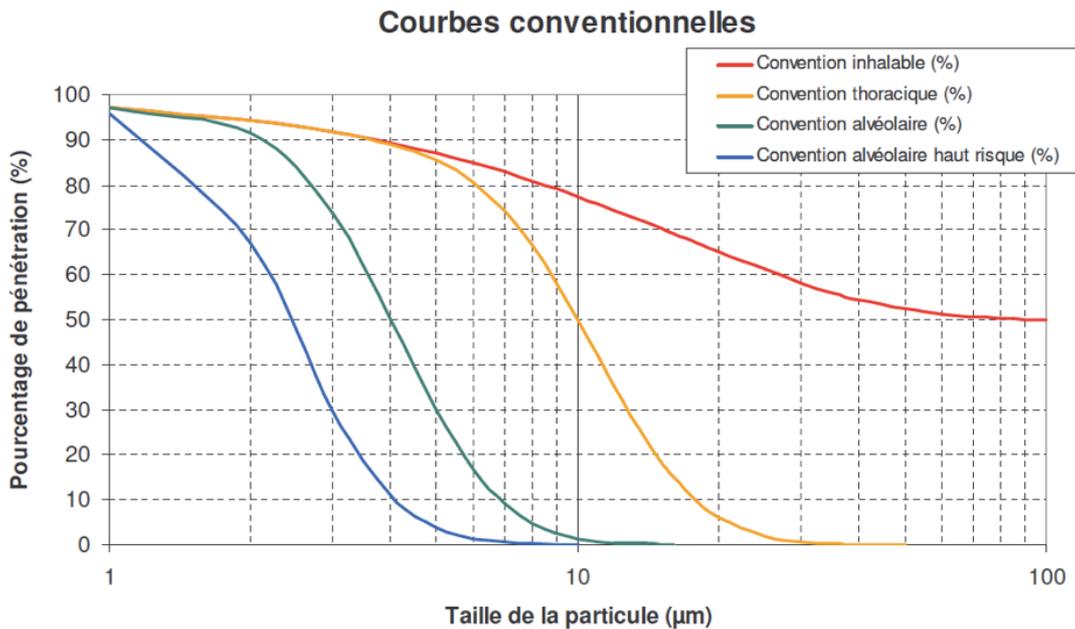


Figure 7 : courbes conventionnelles de pénétration des particules.

Dans le cadre de cette étude seule la fraction inhalable est mesurée.

B. Estimation de la relation dose-réponse

1. Méthode de sélection des VTR

Deux bases de données ont été utilisées pour sélectionner les différentes VTR :

- le portail des substances chimiques de l'INERIS (<https://substances.ineris.fr/fr/>),
- la base de données canadiennes TERA (<https://www.tera.org/iter/>).

Le logigramme de la figure 8 présente la méthode utilisée pour sélectionner les VTR.

L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) est une agence publique française qui assure des missions de veille, d'expertise et de recherche dans le domaine de la santé humaine. Dans le cadre de la sélection des VTR l'expertise collective et indépendante de cette agence est prise en compte de manière prioritaire.

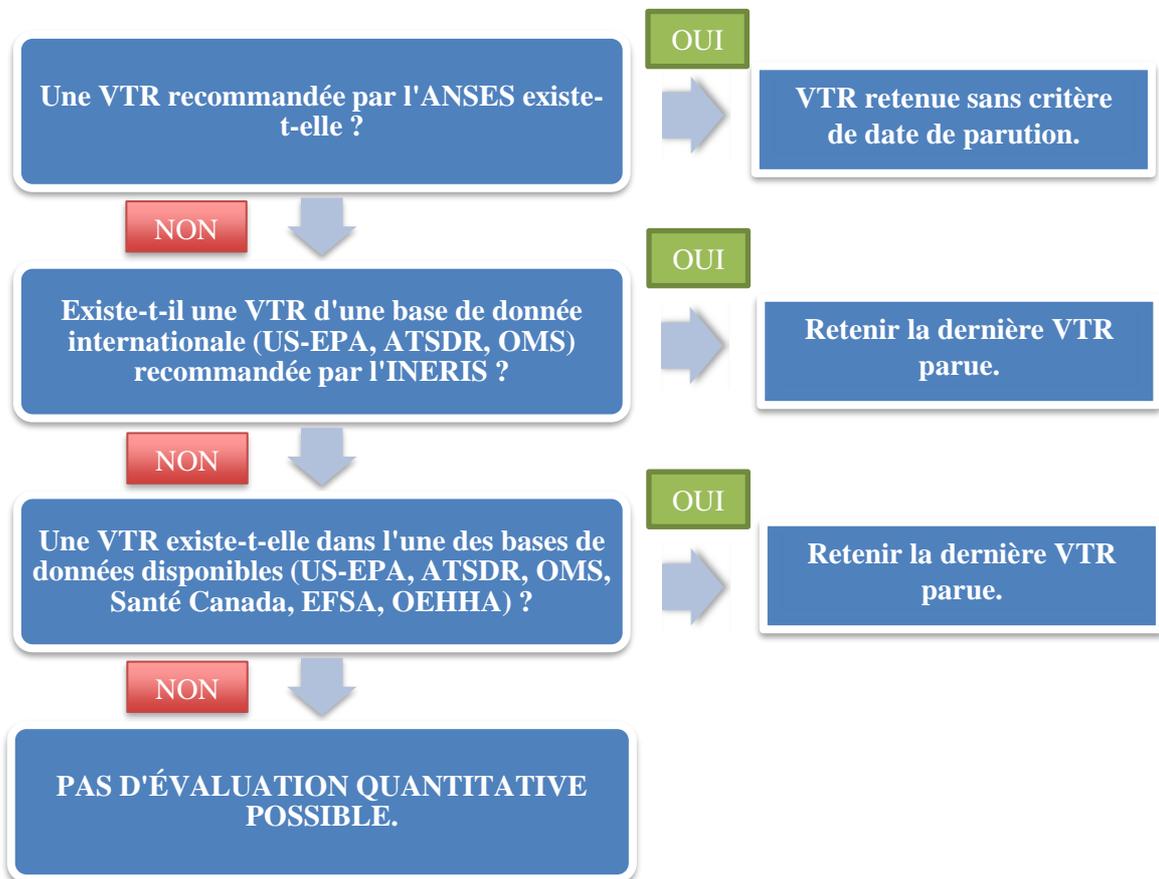


Figure 8 : logigramme – choix des valeurs toxicologiques de référence (VTR).

2. VTR sélectionnées

VTR pour les effets chroniques sans seuil des HAP :

Nous appliquons dans le cadre de cette étude la méthode proposée par l'INERIS à la suite d'une expertise collective (35). Ainsi pour une exposition par inhalation à un mélange de HAPs il est

recommandé de prendre en compte le seul excès de risque unitaire (ERU) spécifique du benzo(a)pyrène et de lui appliquer les facteurs d'équivalence toxique (FET) définis pour les différentes substances présentes dans le mélange.

L'ERU du benzo(a)pyrène proposé par l'OEHHA et pris en compte par le rapport de l'INERIS est $1,10E-03 (\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})^{-1}$. Les différents FET sont proposés dans le rapport de l'INERIS.

VTR pour les effets aigus et chroniques avec seuil du monoxyde de carbone :

Il n'existe pas de VTR disponible pour le monoxyde de carbone. L'ANSES propose de retenir des valeurs guides construites par l'AFSSET en 2007 (36).

Ce rapport propose plusieurs valeurs guides en fonction de la durée d'exposition visant à ne pas dépasser un taux de carboxyhémoglobine de 2,5 % dans l'ensemble de la population.

Dans le cadre de cette étude l'exposition aiguë est mesurée sur une durée de 15 minutes (phase de déblai où l'exposition est la plus importante) avec une valeur guide de $100 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. L'exposition chronique correspond à une exposition prolongée de 8 heures avec une valeur guide de $10 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$.

VTR pour la fraction inhalable des particules présentes dans les fumées d'incendie :

Il n'existe pas de VTR disponible pour la fraction inhalable. La fraction inhalable recouvre en effet des particules aux diamètres supérieurs à 10 micromètres et donc bien au-dessus des particules fines ou ultra-fines qui sont considérées comme les plus toxiques.

Une valeur guide existe pour la fraction inhalable des poussières en suspension (toutes poussières confondues) dans la recommandation européenne (37). Nous utilisons cette valeur guide dans le cadre des exposition chroniques avec seuil : $4 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. Nous notons que cette valeur est bien supérieure aux valeurs guides de l'OMS (expositions sur 24 heures) pour les PM 2,5 et les PM 10 : respectivement 25 et $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

A défaut de disposer d'une VTR propre à la fraction inhalable pour les effets sans seuil de dose nous utilisons un ERU applicable aux PM 10. Cette donnée est présentée dans le rapport de l'AFSSET de 2007 relatif à la qualité de l'air dans les parcs de stationnement couverts (38). L'ERU utilisé dans le cadre de cette étude est égal à $1,27E-07 (\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})^{-1}$.

Les tableaux 7, 8 et 9 récapitulent les VTR sélectionnées pour chacun des polluants étudiés ici, pour les effets aigus à seuil (tableau 7), les effets chroniques à seuil (tableau 8) et les effets sans seuil (tableau 9).

Pour un certain nombre de polluants, aucune VTR n'est disponible : HAP pour tous les effets à seuil ; particules, 1,2,4-triméthylbenzène et naphthalène pour les effets aigus à seuil ; monoxyde de carbone, O-Xylène, M,p-Xylènes, 1,2,4-triméthylbenzène et styrène pour les effets sans seuil. Ces polluants n'ont donc pas été pris en compte pour l'évaluation des risques correspondants.

Polluant	N° CAS	Effets critiques	VTR ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	Facteur d'incertitude	Source	Année de révision	Justification du choix de la VTR
Composés organiques volatils							
Benzène	71-43-2	Symptômes neurologiques : céphalées, asthénie, coma, mort.	30	-	ANSES	2008	VTR retenue par l'ANSES
Toluène	108-88-3	Symptômes neurologiques : céphalées, asthénie, coma, mort.	21 000	15	ANSES	2017	VTR de l'ANSES (Rapport d'expertise collective)
Ethylbenzène	100-41-4	Dépression du système nerveux central (fatigue, ...)	22 000	30	ANSES	2016	VTR de l'ANSES (Rapport d'expertise collective)
O-Xylène	95-47-6	Dépression du système nerveux central (fatigue, ...)	8 840	-	ATSDR	2007	Application d'une VTR pour le mélange des 3 isomères. Seule VTR disponible.
M,p-Xylènes	108-38-3 106-42-3						
1,2,4-triméthylbenzène	95-63-6	Aucune VTR disponible					
Styrène	100-42-5	Dépression du système nerveux central (fatigue, ...)	21 500	-	ATSDR	2010	VTR la plus récente
Naphtalène	91-20-3	Aucune VTR disponible					
Formaldéhyde	50-00-0	Effets irritants et inflammatoires sur les muqueuses nasales	50		ATSDR	1999	VTR retenue par l'INERIS
Acétaldéhyde	75-07-0	Irritation, bronchoconstriction	3 000	-	ANSES	2014	Recommandée par l'ANSES
Hydrogène Aromatiques Polycycliques							
Phénanthrène	85-01-8	Aucune VTR disponible					
Anthracène	120-12-7						
Fluoranthène	206-44-0						
Pyrène	129-00-0						
Benzo(a)anthracène	56-55-3						
Chrysène	218-01-9						
Benzo(b)fluoranthène	205-99-2						
Benzo(k)fluoranthène	207-08-9						
Benzo(a)pyrène	50-32-8						
Dibenzo(a,h)anthracène	53-70-3						
Benzo(ghi)pérylène	191-24-2						
Indéno(1,2,3-c,d)pyrène	193-39-5						
Autres polluants							
Monoxyde de carbone	630-08-0	Effets hypoxiques	100 000	-	AFSSET	2007	Valeur guide retenue par l'ANSES pour une exposition de 15 minutes
Particules - Fraction inhalable	-	Aucune VTR disponible					

Tableau 7 : sélection des VTR pour les effets aigus à seuil (expositions par inhalation).

Polluant	N° CAS	Effets critiques	VTR ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	Facteur d'incertitude	Source	Année de révision	Justification du choix de la VTR
Composés Organiques Volatils							
Benzène	71-43-2	Diminution du nombre des lymphocytes	10	10	ATSDR	2007	VTR la plus récente et facteur d'incertitude le plus faible
Toluène	108-88-3	Troubles neurologiques (troubles de la vision des couleurs...)	19 000	5	ANSES	2017	VTR de l'ANSES (Rapport d'expertise collective)
Ethylbenzène	100-41-4	Dépression du système nerveux central (fatigue, incoordination motrice...)	1 500	75	ANSES	2016	VTR retenue par l'ANSES (Rapport d'expertise collective)
O-Xylène	95-47-6	Dépression du système nerveux central (fatigue, incoordination motrice...)	200	-	ATSDR	2007	Application d'une VTR pour le mélange des 3 isomères. VTR retenue par l'ANSES.
M,p-Xylènes	108-38-3 106-42-3						
1,2,4-triméthylbenzène	95-63-6	Inflammation, lésions pulmonaires	60	-	US EPA	2016	Seule VTR disponible
Styrène	100-42-5	Dépression du système nerveux central (fatigue, incoordination motrice...)	860	-	ATSDR	2010	Recommandée par l'INERIS
Naphtalène	91-20-3	Lésions de l'épithélium respiratoire et olfactif	37	250	ANSES	2013	VTR de l'ANSES (Rapport d'expertise collective)
Formaldéhyde	50-00-0	Irritations nasales, lésions de l'épithélium nasal	9	-	OEHHA	2008	VTR retenue par l'INERIS
Acétaldéhyde	75-07-0	Dégénérescence de l'épithélium olfactif	160	-	ANSES	2014	Recommandée par l'INERIS et l'ANSES
Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques							
Phénanthrène	85-01-8	Aucune VTR disponible					
Anthracène	120-12-7						
Fluoranthène	206-44-0						
Pyrène	129-00-0						
Benzo(a)anthracène	56-55-3						
Chrysène	218-01-9						
Benzo(b)fluoranthène	205-99-2						
Benzo(k)fluoranthène	207-08-9						
Benzo(a)pyrène	50-32-8						
Dibenzo(a,h)anthracène	53-70-3						
Benzo(ghi)pérylène	191-24-2						
Indéno(12,3-c,d)pyrène	193-39-5						
Autres polluants							
Monoxyde de carbone	630-08-0	Effets hypoxiques	10 000	-	AFSSET	2007	Valeur guide retenue par l'ANSES pour une exposition de 8 heures
Particules - Fraction inhalable	-	Troubles respiratoires	4 000	-	DFG (Fondation Allemande pour la Recherche)	2018	Valeur guide protectrice, à défaut de pouvoir disposer d'une VTR

Tableau 8 : sélection des VTR pour les effets chroniques à seuil (expositions par inhalation).

Polluant	N° CAS	Effets critiques	VTR ($\mu\text{g.m}^{-3}$) ⁻¹	Source	Année de révision	Justification du choix de la VTR	
Composés Organiques Volatils							
Benzène	71-43-2	Leucémies aiguës	2,60E-05	ANSES	2013	VTR de l'ANSES	
Toluène	108-88-3			Aucune VTR disponible			
Ethylbenzène	100-41-4	Carcinome des cellules rénales	2,50E-06	OEHHA	2007	Seule VTR disponible	
O-Xylène	95-47-6			Aucune VTR disponible			
M,p-Xylènes	108-38-3 106-42-3						
1,2,4-triméthylbenzène	95-63-6						
Styrène	100-42-5						
Naphtalène	91-20-3	Augmentation de l'incidence des neuroblastes de l'épithélium olfactif	5,60E-06	ANSES	2013	VTR de l'ANSES (rapport d'expertise collective)	
Formaldéhyde	50-00-0	Tumeurs nasales	5,26E-06	Santé Canada	2000	Dernière VTR parue et retenue par l'INERIS	
Acétaldéhyde	75-07-0	Carcinomes des cellules squameuses de la cloison nasale	2,20E-06	US EPA	1991	VTR retenue par l'INERIS	
Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques							
			VTR ($\mu\text{g.m}^{-3}$) ⁻¹	FET			
Phénanthrène	85-01-8	Incidence des tumeurs du tractus respiratoire supérieur (cavités nasales, larynx et trachée)	1,10E-03	0,001	OEHHA	2008	Procédure utilisant des Facteurs d'Équivalence Toxique (FET), recommandée par l'INERIS.
Anthracène	120-12-7			0,01			
Fluoranthène	206-44-0			0,001			
Pyrène	129-00-0			0,001			
Benzo(a)anthracène	56-55-3			0,1			
Chrysène	218-01-9			0,01			
Benzo(b)fluoranthène	205-99-2			0,1			
Benzo(k)fluoranthène	207-08-9			0,1			
Benzo(a)pyrène	50-32-8			1			
Dibenzo(a,h)anthracène	53-70-3			1			
Benzo(ghi)pérylène	191-24-2			0,01			
Indéno(12,3-c,d)pyrène	193-39-5			0,1			
Autres polluants							
Monoxyde de carbone	630-08-0			Aucune VTR disponible			
Particules - Fraction inhalable	-	Mortalité toute cause (sauf accidentelle)	1,27E-07	AFSSET	2007	Inexistence de VTR pour la fraction inhalable. Utilisation de la VTR appliquée aux PM 10.	

Tableau 9 : sélection des VTR pour les effets chroniques sans seuil (expositions par inhalation).

C. Évaluation des expositions

1. Estimation de la durée d'exposition vie entière chez les sapeurs-pompiers de Paris.

L'évaluation quantitative de l'impact sanitaire lié aux effets sans seuil de dose nécessite de déterminer une durée d'exposition sur l'ensemble de la vie des populations étudiées.

Dans le cadre de cette étude, nous utilisons le TEO annuel en phase « post-incendie » calculé à l'aide de la matrice d'exposition des sapeurs-pompiers de Paris (*cf. partie III – chapitre C – titre 2*).

Le processus d'avancement de la BSPP jusqu'au grade d'adjudant-chef est exclusivement effectué en interne en occupant successivement chacun des grades. L'exposition vie entière des sapeurs-pompiers de Paris correspond donc à la somme des expositions dans l'ensemble des grades occupés antérieurement. Pour chacun des grades antérieurs, on appliquera une durée d'occupation équivalente à l'ancienneté moyenne dans le grade.

Dans le tableau 10 l'évolution de carrière se lit de bas en haut, c'est-à-dire du grade initial de sapeur jusqu'au grade d'adjudant-chef.

Par exemple, l'équation ci-dessous correspond au calcul permettant d'obtenir le TEO vie entière en phase post-extinction d'un caporal :

$$\begin{aligned} \text{TEO vie entière phase post incendie Caporal} \\ = (\text{TEO annuel sapeur} \times \text{Ancienneté moyenne dans le grade de sapeur}) \\ + (\text{TEO annuel caporal} \times \text{Ancienneté moyenne dans le grade de caporal}) \end{aligned}$$

Grade	Ancienneté moyenne (en années)	Ancienneté moyenne dans le grade (en années)	TEO annuel en phase post-extinction (en heures)	TEO vie entière en phase post-extinction (en heures)
Lieutenant	10,3	10,3	3,5	36,1
Adjudant-chef	22,3	3,5	2,9	107,2
Adjudant	18,8	3,9	3,4	97,1
Sergent-chef	14,9	4,6	4,1	83,8
Sergent	10,3	2,9	5,8	64,9
Caporal-chef	7,4	1,9	8,0	48,1
Caporal	5,5	2,3	6,1	32,9
Sapeur	3,2	3,2	5,9	18,9

Tableau 10 : estimation de l'exposition vie entière des sapeurs-pompiers de Paris.

2. Concentrations en polluant mesurées dans le cadre des essais.

Le tableau 11 présente les concentrations en polluants recueillies dans le cadre des différents essais. Les données réunies dans ce tableau proviennent du rapport technique du LCPP (21).

Ces concentrations en polluants sont de deux types :

- **une concentration maximale en phase post-extinction** correspondant à celle mesurée durant la phase de déblai sur une durée de 10 à 15 minutes,

- une concentration moyenne en phase post-extinction recueillie durant toute la phase de mesure.

Pour la suite de cette étude, les concentrations maximales seront utilisées pour caractériser le risque lié aux effets aigus à seuil des substances et les concentrations moyennes pour caractériser le risque lié aux effets chroniques à seuil.

Pour le risque associé aux effets sans seuil des fumées d'incendie, nous prenons la décision d'étudier le pire scénario en utilisant les concentrations maximales mesurées en phase post-extinction.

On observe que les concentrations mesurées après l'utilisation de la brumisation sont toujours inférieures à celles mesurées avec la lance traditionnelle, que ce soit au niveau des maxima ou des moyennes.

Polluant	N° CAS	Concentration lance traditionnelle ($\mu\text{g.m}^{-3}$)		Concentration brumisation ($\mu\text{g.m}^{-3}$)	
		Valeurs maximales	Valeurs moyennes	Valeurs maximales	Valeurs moyennes
Composés organiques volatils					
Benzène	71-43-2	1 500	791	230	133
Toluène	108-88-3	120	80	76	51
Ethylbenzène	100-41-4	140	85	22	15
O-Xylène	95-47-6	71	50	67	38
M,p-Xylènes	108-38-3 106-42-3	250	39	22	15
1,2,4-triméthylbenzène	95-63-6	69	39	22	15
Styrène	100-42-5	160	86	27	19
Naphtalène	91-20-3	90	57	18	12
Formaldéhyde	50-00-0	2 400	1 350	180	91
Acétaldéhyde	75-07-0	3 500	1 885	280	141
Hydrocarbures aromatiques polycycliques					
Phénanthrène	85-01-8	3,800	2,070	1,200	0,660
Anthracène	120-12-7	0,970	0,890	0,054	0,037
Fluoranthène	206-44-0	6,000	3,030	0,250	0,160
Pyrène	129-00-0	3,100	1,580	0,290	0,240
Benzo(a)anthracène	56-55-3	2,300	1,150	0,054	0,037
Chrysène	218-01-9	4,200	2,110	0,095	0,057
Benzo(b)fluoranthène	205-99-2	2,400	2,100	0,091	0,055
Benzo(k)fluoranthène	207-08-9	0,730	0,370	0,018	0,012
Benzo(a)pyrène	50-32-8	1,100	0,550	0,018	0,012
Dibenzo(a,h)anthracène	53-70-3	0,460	0,230	0,018	0,012
Benzo(ghi)pérylène	191-24-2	0,250	0,130	0,018	0,012
Indéno(12,3-c,d)pyrène	193-39-5	0,570	0,290	0,018	0,012
Autres polluants					
Monoxyde de carbone	630-08-0	128 000	63 000	30 300	10 500
Particules - Fraction inhalable	-	97 300	46 433	57 800	29 773

Tableau 11 : concentrations en polluants mesurées dans le cadre des essais.

D. Caractérisation des risques

Dans cette étape l'objectif est de donner un indicateur de niveau de risque au décideur pour éclairer sa décision. La méthode de caractérisation des risques est différente pour des effets avec seuil ou sans seuil.

- **Pour les effets toxiques avec seuil** c'est le dépassement de la VTR qui détermine l'éventuelle survenue d'un effet toxique.

On calcule donc un Quotient de Danger (QD) qui correspond au rapport de la concentration de polluants inhalée (C_i^M) sur la VTR.

La concentration inhalée est maximale pour les effets aigus et moyenne pour les effets chroniques.

$$QD = \frac{C_i^M}{VTR}$$

Lorsque le QD est très inférieur à 1 cela signifie que la population exposée est théoriquement hors de danger. Si au contraire le QD est significativement supérieur ou égal à 1 cela signifie que l'effet toxique peut se déclarer sans qu'il soit possible de prédire la probabilité de survenue de cet événement.

- **Pour les effets toxiques sans seuil** on calcule l'ERI, c'est-à-dire la probabilité de survenue d'une pathologie pour une population donnée. Il s'agit d'un risque en excès car il vient s'ajouter au risque de base présent dans cette population.

On obtient l'ERI en rapportant l'ERU vie entière sur la durée totale d'exposition d'une population pour une concentration de polluant inhalée (C_i).

$$ERI = C_i \times ERU \times \frac{TE}{TP}$$

Avec TP la durée d'une vie entière (70 ans par convention) et TE la durée cumulée d'exposition de la population étudiée sur la vie entière, exprimée dans la même unité.

L'ERI s'interprète comme un sur-risque individuel de cancer dû à l'exposition au cours d'une vie entière. En le multipliant par le nombre d'individus exposés, on obtient un nombre total de cas de cancers en excès attendus à cause de l'exposition. Ces résultats peuvent être comparés à des niveaux de risque couramment utilisés comme seuils. Ainsi, l'agence américaine de protection de l'environnement considère comme « acceptable » des niveaux de risque individuel allant jusqu'à $1,0E-6$ (une chance sur un million d'être atteint par un cancer) à $1,0E-4$ (une chance sur 10 000 d'être atteint par un cancer) qui est le seuil de déclenchement d'actions de prévention (39).

En France le seuil d'acceptabilité du risque de $1,0E-5$ est régulièrement cité comme par exemple dans la circulaire relative à la gestion des sols pollués (40).

Il faut cependant rester prudent vis-à-vis de la notion de risque « acceptable » qui pose des problèmes éthiques et est débattue au niveau international.

1. Caractérisation des risques pour les effets aigus avec seuil

Le tableau 12 présente les résultats obtenus en termes de caractérisation des risques pour les effets aigus à seuil, liés à une exposition maximale.

La figure 9 résume les principaux niveaux de risques (QD les plus élevés) et permet une comparaison visuelle des risques avec une lance traditionnelle et avec la brumisation.

On peut constater une diminution de tous les QD lors de l'emploi de la brumisation. Cette diminution est de l'ordre d'un facteur 10 pour l'exposition au formaldéhyde et à l'acétaldéhyde et un facteur d'environ 5 pour le benzène et le monoxyde de carbone.

Polluant	N° CAS	Concentration lance traditionnelle ($\mu\text{g.m}^{-3}$)	Concentration brumisation ($\mu\text{g.m}^{-3}$)	VTR ($\mu\text{g.m}^{-3}$)	QD lance traditionnelle	QD brumisation
Composés organiques volatils						
Benzène	71-43-2	1 500	230	30	50,00	7,67
Toluène	108-88-3	120	76	21 000	0,01	0,00
Ethylbenzène	100-41-4	140	22	22 000	0,01	0,00
O-Xylène	95-47-6	71	67	8 840	0,04	0,01
M,p-Xylènes	108-38-3 106-42-3	250	22			
Styrène	100-42-5	160	27	21 500	0,01	0,00
Formaldéhyde	50-00-0	2 400	180	50	48,00	3,60
Acétaldéhyde	75-07-0	3 500	280	3 000	1,17	0,09
Autres polluants						
Monoxyde de carbone	630-08-0	128 000	30 300	100 000	1,28	0,30

Tableau 12 : caractérisation du risque pour les effets toxiques aigus à seuil.

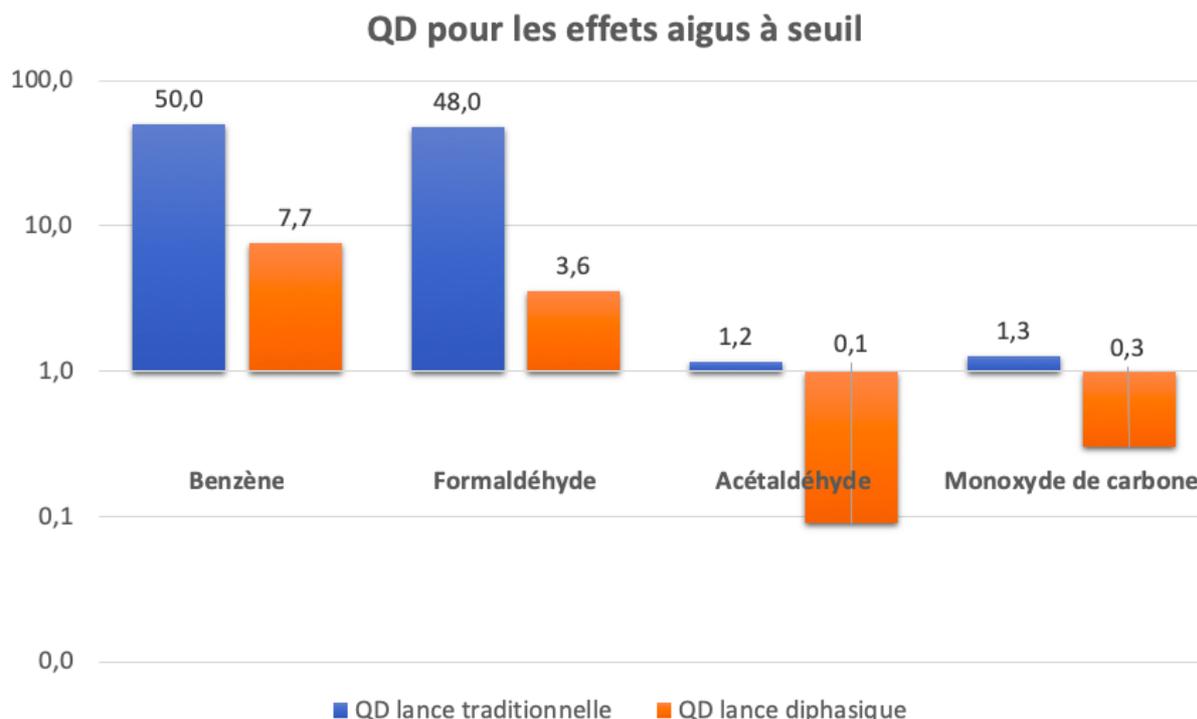


Figure 9 : caractérisation du risque pour les effets aigus avec seuil.

Comparaison des quotients de danger avec lance traditionnelle (en bleu) et brumisation (en orange).

Nous notons également que l'emploi de la brumisation permet, dans le cadre d'une exposition aiguë à l'acétaldéhyde et au monoxyde de carbone, d'obtenir un QD largement inférieur à 1 et donc à mettre notre population hors de danger alors même que ce danger existe avec une lance traditionnelle.

Malgré une certaine diminution des QD avec l'emploi de la brumisation l'exposition aiguë au benzène et au formaldéhyde demeure préoccupante :

- le benzène présente les QD les plus élevés avec un niveau d'exposition 50 fois supérieur à la VTR lors de l'usage d'une lance traditionnelle et environ 8 fois supérieur avec l'emploi de la brumisation. Les premiers signes d'intoxication sont neurologiques et peuvent mener jusqu'à la mort en cas de fortes doses,
- le formaldéhyde et ses effets irritants pour les voies respiratoires doit également être pris en compte. Les QD associés à cette substance permettent de mettre en lumière la mise en danger des sapeurs-pompiers.

2. Caractérisation des risques pour les effets chroniques avec seuil

Le tableau 13 présente les résultats obtenus en termes de caractérisation des risques pour les effets chroniques à seuil. La figure 10 résume les principaux niveaux de risques (QD les plus élevés) et permet une comparaison visuelle des risques avec une lance traditionnelle et avec la brumisation.

Polluant	N° CAS	Concentration lance traditionnelle (µg.m ⁻³)	Concentration brumisation (µg.m ⁻³)	VTR (µg.m ⁻³)	QD lance traditionnelle	QD brumisation
Composés Organiques Volatils						
Benzène	71-43-2	791	133	10	81,18	13,69
Toluène	108-88-3	80	51	19 000	0,00	0,00
Ethylbenzène	100-41-4	85	15	1 500	0,06	0,01
O-Xylène	95-47-6	50	38	200	0,45	0,27
M,p-Xylènes	108-38-3 106-42-3	39	15			
1,2,4-triméthylbenzène	95-63-6	39	15	60	0,66	0,26
Styrène	100-42-5	86	19	860	0,10	0,02
Naphtalène	91-20-3	57	12	37	1,54	0,35
Formaldéhyde	50-00-0	1 350	91	9	150,00	10,18
Acétaldéhyde	75-07-0	1 885	141	160	11,78	0,89
Autres polluants						
Monoxyde de carbone	630-08-0	63 000	10 500	10 000	6,30	1,05
Particules - Fraction inhalable	-	46 433	29 773	4 000	11,61	7,44

Tableau 13 : caractérisation du risque pour les effets toxiques chroniques à seuil.

QD pour les effets chroniques à seuil

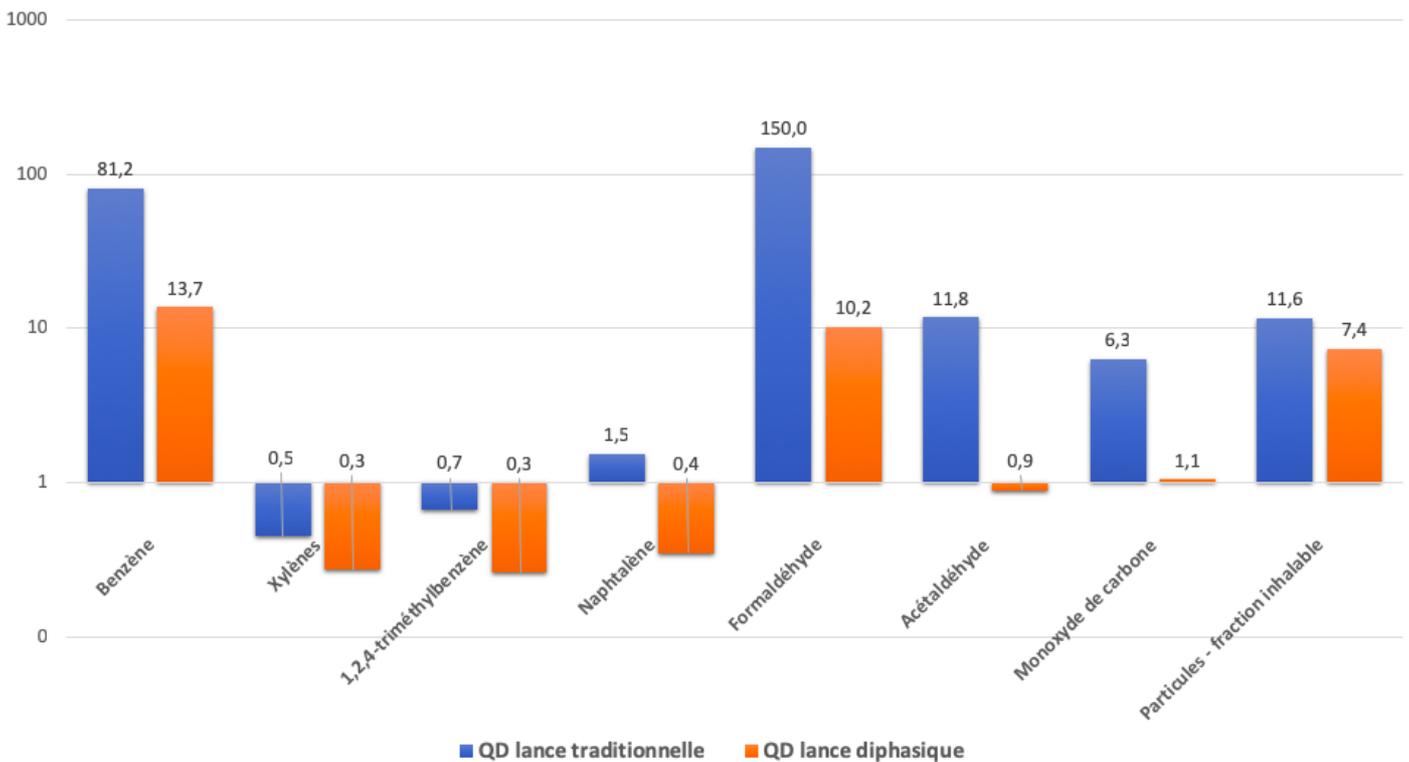


Figure 10 : caractérisation du risque pour les effets chroniques avec seuil. Comparaison des quotients de danger avec lance traditionnelle (en bleu) et brumisation (en orange)

Nous observons systématiquement des QD inférieurs avec l'usage de la brumisation lorsqu'on les compare aux QD liés à l'usage de la lance traditionnelle. Cette diminution est dans les meilleurs cas de l'ordre d'un facteur 15 pour l'exposition au formaldéhyde et de 13 pour l'exposition à l'acétaldéhyde. On recense une diminution plus faible du risque pour les expositions aux particules (fraction inhalable) avec un facteur de diminution équivalent à 1,5 environ.

On peut noter que cette diminution du risque liée à l'usage de la brumisation permet de faire passer le QD associé à l'exposition chronique au naphthalène nettement en dessous de 1 et d'obtenir un QD proche de 1 pour l'acétaldéhyde (QD = 0,9) et le monoxyde de carbone (QD = 1,1).

Cette caractérisation du risque permet également de constater que le risque lié à cette exposition aux fumées incendie reste très élevé pour les effets chroniques à seuil :

- l'exposition au formaldéhyde occasionne un QD de 150 avec une lance traditionnelle et un QD d'environ 10 lors de l'usage de la brumisation. L'effet critique attendu est une irritation des voies aériennes supérieures,
- l'exposition chronique au benzène, pouvant entraîner une diminution du nombre de lymphocytes, présente un risque avéré avec un QD de 81 avec la lance traditionnelle et d'environ 14 avec la brumisation,
- avec la lance traditionnelle l'exposition chronique à l'acétaldéhyde et au monoxyde de carbone présente un risque critique. Ce risque est ramené à un QD d'environ 1 avec la brumisation,
- l'exposition chronique aux particules (fraction inhalable) et les troubles respiratoires associés comporte un risque avéré pour les deux moyens d'extinctions utilisés avec des QD de l'ordre de 10.

3. Caractérisation des risques pour les effets sans seuil

a) *Excès de Risque Individuels*

La caractérisation des risques pour les effets sans seuil est effectuée en fonction de la durée d'exposition au cours de la vie entière. Elle est donc obtenue en fonction du temps d'engagement opérationnel en phase post-extinction défini par grade dans la partie *estimation des expositions* (Partie IV – Titre C – chapitre 1).

Il est décidé dans ce rapport de ne pas donner le détail de la caractérisation des risques pour chacun des grades, mais de se concentrer sur le scénario comportant la plus grande durée d'exposition : la **population des adjudants-chefs**.

A titre illustratif, le tableau 14 présente les résultats en termes de caractérisation du risque de cancer pour la population des adjudants-chefs. Cette population concentre en effet la durée d'exposition la plus importante sur la vie entière avec 107,2 heures d'exposition et donc le risque le plus élevé pour ce type d'effets chroniques.

La figure 11 résume les ERI obtenus de manière visuelle et permet de comparer les risques avec l'emploi d'une lance traditionnelle et avec la brumisation.

Polluant	N° CAS	Concentration lance traditionnelle ($\mu\text{g.m}^{-3}$)	Concentration brumisation ($\mu\text{g.m}^{-3}$)	ERU ($\mu\text{g.m}^{-3}$) ⁻¹	TE (en heures)	ERI lance traditionnelle	ERI brumisation
Composés Organiques Volatils							
Benzène	71-43-2	1500	230	2,60E-05	107,2	6,82E-06	1,05E-06
Ethylbenzène	100-41-4	140	22	2,50E-06	107,2	6,12E-08	9,62E-09
Naphtalène	91-20-3	90	18	5,60E-06	107,2	8,81E-08	1,76E-08
Formaldéhyde	50-00-0	2400	180	5,26E-06	107,2	2,21E-06	1,66E-07
Acétaldéhyde	75-07-0	3500	280	2,20E-06	107,2	1,35E-06	1,08E-07
Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques							
Phénanthrène	85-01-8	3,800	1,200	1,10E-06	107,2	4,28E-07	1,11E-08
Anthracène	120-12-7	0,970	0,054	1,10E-05	107,2		
Fluoranthène	206-44-0	6,000	0,250	1,10E-06	107,2		
Pyrène	129-00-0	3,100	0,290	1,10E-06	107,2		
Benzo(a)anthracène	56-55-3	2,300	0,054	1,10E-04	107,2		
Chrysène	218-01-9	4,200	0,095	1,10E-05	107,2		
Benzo(b)fluoranthène	205-99-2	2,400	0,091	1,10E-04	107,2		
Benzo(k)fluoranthène	207-08-9	0,730	0,018	1,10E-04	107,2		
Benzo(a)pyrène	50-32-8	1,100	0,018	1,10E-03	107,2		
Dibenzo(a,h)anthracène	53-70-3	0,460	0,018	1,10E-03	107,2		
Benzo(ghi)pérylène	191-24-2	0,250	0,018	1,10E-05	107,2		
Indéno(12,3-c,d)pyrène	193-39-5	0,570	0,018	1,10E-04	107,2		
Autres polluants							
Particules - Fraction inhalable	-	97 300	57 800	1,27E-07	107,2	2,16E-06	1,28E-06

Tableau 14 : caractérisation du risque pour les effets toxiques sans seuil chez les adjudants-chefs

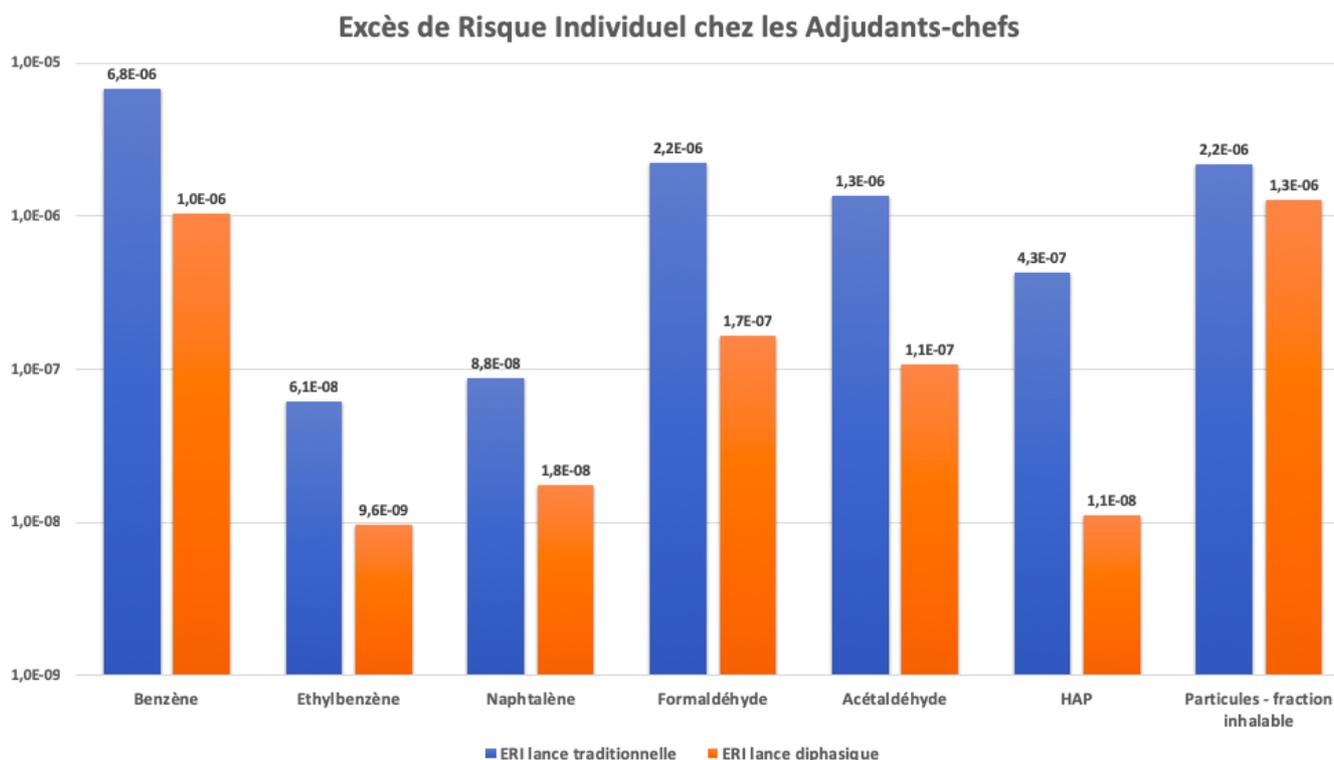


Figure 11 : caractérisation du risque pour les effets sans seuil chez les adjudants-chefs. Comparaison des ERI avec lance traditionnelle (en bleu) et brumisation (en orange).

A travers les résultats observés pour la population des adjudants-chefs, présentant la plus grande période d'exposition aux fumées d'incendie et donc le risque le plus important en ce qui concerne les expositions chroniques sans seuil, nous pouvons établir des observations générales pour l'ensemble de la population étudiée.

Tout d'abord, l'ensemble des ERI évalués sont en dessous de 1,0E-5. Ceci suggère que les surrisques de cancer observés dans le cadre de cette étude ne nécessitent pas la mise en place immédiate de mesures de prévention chez les sapeurs-pompiers de Paris.

Par ailleurs, pour l'ensemble des polluants étudiés les ERI diminuent avec l'utilisation de la brumisation.

L'excès de risque associé à l'exposition à des HAP est 32 fois moins important avec l'emploi de la brumisation comparé avec l'emploi d'une lance traditionnelle.

Pour les autres polluants cette réduction est moins marquée avec par exemple une diminution d'un facteur 15 pour le formaldéhyde et de moitié pour les particules (fraction inhalable).

L'ensemble des ERI liés à l'emploi de la brumisation sont en dessous ou égal au seuil de 1,0E-6 soit une chance sur un million de déclencher un cancer en lien avec l'exposition étudiée. Ces ERI peuvent donc être considérés comme faibles selon le point de vue employé aux États-Unis.

S'agissant d'effets sans seuil, nous devons tout de même considérer que toute exposition, même infime, peut être à l'origine du déclenchement d'une dégénérescence maligne.

Ainsi deux ERI associés à l'usage d'une lance traditionnelle doivent particulièrement être pris en compte :

- avec un ERI de 6,8E-6 l'exposition au benzène qui est un cancérogène avéré avec le déclenchement possible de leucémies (groupe 1 selon le CIRC) demeure non négligeable,
- le formaldéhyde également considéré cancérogène avéré (groupe 1 selon le CIRC) présente un ERI non négligeable de 2,2E-6.

L'ERI pour la fraction inhalable des particules lors de l'emploi d'une lance traditionnelle est de 2,2E-6. Cette valeur doit cependant être prise en compte avec précaution, en conservant à l'esprit que l'ERU utilisé est celui applicable aux PM 10 (Partie IV – Titre B – chapitre 2).

b) ERI tous polluants cumulés et Excès de Risque Cumulés (ERC)

Conformément aux recommandations de l'US-EPA, il est possible de sommer l'ensemble des ERI liés à une exposition conjointe à plusieurs agents dangereux quels que soient le type de cancer et l'organe touché afin d'apprécier le risque cancérogène global. Dans le tableau 15 et la figure 12 cette sommation correspond à l'ERI tous polluants cumulés.

En multipliant les ERI obtenus aux effectifs de chaque grade on obtient l'excès de risque collectif (ERC).

$$ERC = ERI \times \text{Effectif dans le grade}$$

Grade	Effectif REO	ERI tous polluant cumulés - lance traditionnelle	ERI tous polluant cumulés - brumisation	ERC par grade - lance traditionnelle	ERC par grade – brumisation	ERC total - lance traditionnelle	ERC total - brumisation
Lieutenant	48	4,4E-06	8,9E-07	2,1E-04	4,3E-05	0,019	0,004
Adjudant - chef	24	1,3E-05	2,6E-06	3,1E-04	6,2E-05		
Adjudant	71	1,2E-05	2,4E-06	8,5E-04	1,7E-04		
Sergent -chef	105	1,0E-05	2,1E-06	1,1E-03	2,2E-04		
Sergent	498	7,9E-06	1,6E-06	3,9E-03	8,0E-04		
Caporal -chef	771	5,9E-06	1,2E-06	4,5E-03	9,3E-04		
Caporal	897	4,0E-06	8,1E-07	3,6E-03	7,3E-04		
Sapeur	1961	2,3E-06	4,7E-07	4,5E-03	9,2E-04		

Tableau 15 : excès de risques cumulés.

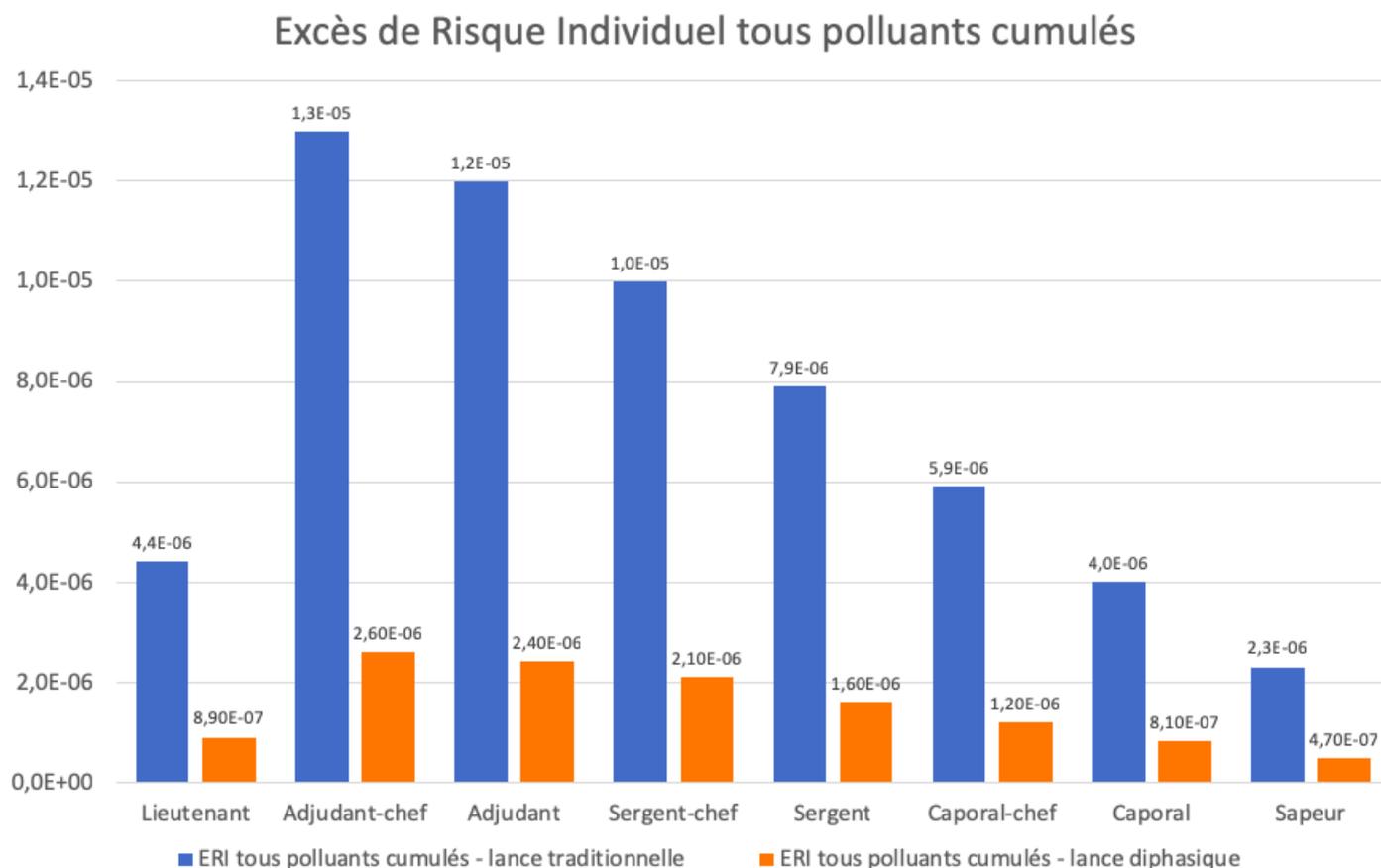


Figure 12 : excès de risque individuels tous polluants cumulés par grade.

La figure 12 présente les ERI tous polluants cumulés pour chacun des grades. On peut observer que cet ERI est directement lié à la durée totale d'exposition au cours de la vie entière et donc que les ERI les plus importants concernent les sous-officiers supérieurs.

L'utilisation de la brumisation occasionne une réduction de ces ERI totaux d'un facteur 5 environ. Ainsi l'ERI tous polluants cumulés pour la pollution des adjudants-chefs passe de $1,3E-5$ avec une lance traditionnelle (soit 1 chance sur 100 000 de développer un cancer lié à l'exposition aux fumées d'incendie) à $2,6E-6$ si cette lance est remplacée par la brumisation (soit environ 2,5 chances sur un million de développer un cancer lié à l'exposition aux fumées d'incendie).

Pour l'ensemble de la population étudiée, constituée des 4 375 sapeurs-pompiers de Paris en service opérationnel d'incendie et de secours, nous avons calculé un excès de risque collectif (ERC).

Avec l'utilisation d'une lance traditionnelle cet ERC est égal à 0,019 cas de cancer en excès, soit 0,019 cas de cancer attendus qui seraient attribuables à une exposition par inhalation aux fumées d'incendie, lors des phases post-extinction et au cours de la vie entière de la population de sapeurs-pompiers étudié.

Cet ERC est de 0,004 si l'on remplace la lance traditionnelle par la brumisation.

La différence entre ces deux ERC peut être considéré comme le nombre de cas de cancers évitables avec la mise en œuvre de la brumisation : 0,015. La taille de la population étudiée étant limitée, cet impact en termes de réduction des risques de cancers demeurerait invisible.

V. Discussion

A. Synthèse des résultats

Les résultats permettent de répondre à la problématique initiale en comparant l'impact sanitaire lié à l'usage d'une lance traditionnelle à l'impact sanitaire associé à l'emploi de la brumisation.

Cette comparaison permet de conclure de manière générale que la **brumisation a un rôle « protecteur »** dans le cadre de l'exposition des sapeurs-pompiers de Paris aux fumées d'incendie en phase post-extinction, à travers notamment :

- Effets aigus : diminution du Quotient de Danger d'un facteur compris entre 5 et 10 en fonction du polluant étudié. Cette diminution permet pour certains polluants de mettre le sapeur-pompier hors de danger avec un Quotient de Danger qui devient inférieur à 1.
- Effets chroniques avec seuil de dose : diminution du Quotient de Danger variable selon le polluant concerné avec une diminution minimale de 1,5 et un maximum de 15. Pour deux polluants cette diminution permet d'obtenir un Quotient de Danger inférieur à 1.
- Effets sans seuil de dose : l'Excès de Risque Individuel pour tous les polluants cumulés est divisé par un facteur 5 environ. Cela correspond à 0,004 cas de cancers en excès attendus contre 0,019 cas avec l'usage d'une lance traditionnelle.

L'effet « protecteur » de la brumisation correspond aux premières observations relevées dans la littérature scientifique. Cette diminution de concentration des polluants peut être expliquée par la capacité pour le brouillard d'eau de capter certains gaz et de lessiver les suies.

Au-delà de cette problématique initiale l'observation des résultats de cette étude permet de faire une analyse générale de l'impact sanitaire lié à cette exposition :

- Deux COV sont particulièrement préoccupants pour les effets aigus et les effets chroniques avec seuil de dose : **le benzène et le formaldéhyde**,
 - o avec l'emploi d'une lance traditionnelle, on obtient des concentrations près de 50 fois supérieures aux VTR pour ce qui est des effets aigus et des QD compris entre 80 et 150 pour les effets chroniques à seuil,
 - o lors de l'utilisation de la brumisation, le risque lié à l'exposition à ces deux COV demeure avec des QD de l'ordre de 5 pour les effets aigus et de 10 pour les effets chroniques.
- Dans le cadre des expositions chroniques avec seuil, 3 autres polluants doivent être pris en compte : l'acétaldéhyde, le monoxyde de carbone et la fraction inhalable des particules en suspension. Leurs QD sont de l'ordre de 10 lors de l'emploi d'une lance traditionnelle et sont ramenés à 1 avec la brumisation mis à part pour les particules en suspension (QD = 7).
- Quel que soit le polluant étudié, la catégorie de sapeur-pompier et le type de moyen d'extinction les ERI sont tous inférieurs à $1,0E-5$, parfois considéré comme un seuil d'acceptabilité. **Si l'on cumule ces ERI ce seuil est dépassé dans la population des sous-officiers avec l'emploi d'une lance traditionnelle (sergent-chef, adjudant et adjudant-chef), soit plus d'une chance sur 100 000 de déclencher un cancer en lien avec l'exposition étudiées.**

En conclusion un risque sanitaire existe particulièrement associé à des expositions aiguës et chroniques au benzène et au formaldéhyde et ceci quel que soit le moyen d'extinction employé.

Le risque d'apparition de cancers ne peut pas être considéré comme acceptable, spécifiquement pour les personnels ayant une longue période d'exposition professionnelle avec l'emploi de lances traditionnelles (sous-officiers supérieurs).

B. Limites de l'étude

L'évaluation quantitative des risques sanitaires permet d'obtenir des ordres de grandeurs et de réduire l'incertitude dans un processus de décision mais elle comporte des incertitudes et des facteurs de sous-estimation ou de surestimation du risque. Les principales sources d'incertitude et les limites de cette étude sont listées dans cette partie.

Identification des dangers

Sur les 200 produits toxiques dénombrés dans les fumées d'incendie cette étude n'est en mesure d'en prendre en compte qu'une vingtaine. Le frein est ici avant tout technique du fait de l'absence de matériel de mesure ou de capacité de multiplier les prélèvements atmosphériques.

Par exemple l'amiante est un produit cancérigène (groupe 1 du CIRC) que le sapeur-pompier peut rencontrer sur intervention or ce polluant n'est pas pris en compte dans le cadre de cette étude. En effet, l'ensemble des combustibles utilisés au cours des essais ne contenaient pas de fibres d'amiante.

De plus les substances retenues sont prises en compte de manière isolée sans prendre en compte les effets synergiques ou les « effets cocktails » que l'on peut retrouver dans ce type de mélange toxique.

En ce qui concerne les particules en suspension des contraintes techniques nous obligent à mesurer uniquement la fraction inhalable. Or, la littérature scientifique permet de conclure que les particules de diamètres inférieurs ont un potentiel toxique plus important.

L'ensemble de ces remarques permettent de supposer une **sous-estimation du risque**.

La sélection des VTR

L'élaboration des VTR est principalement issue d'études expérimentales chez l'animal et plus rarement d'études épidémiologiques chez l'homme.

Afin de prendre en compte ces différentes sources d'incertitudes, cette étape nécessite l'introduction de facteurs de sécurité pour les transpositions inter-espèces, inter-individus et les extrapolations de résultats expérimentaux à de fortes doses vers des doses faibles.

L'introduction de ces différents facteurs d'incertitudes peuvent occasionner une **surestimation du risque**.

Malgré une recherche dans les différentes bases de données internationales certaines substances toxiques ne disposent pas de VTR.

Face à cette absence de données, des valeurs guides sont utilisées pour certaines substances dans le cadre de cette EQRS (monoxyde de carbone, effets chroniques à seuil des particules). Ce choix peut occasionner une **surestimation du risque**.

Pour les effets sans seuil de dose associés aux particules en suspension, nous utilisons un ERU applicable aux PM 10. Or dans le cadre de cette étude, les mesures de concentrations concernent la fraction

inhalable des particules en suspension, fraction moins toxique que les PM 10. Cette décision occasionne donc une **surestimation du risque**.

Dans la majorité des cas en l'absence de VTR l'évaluation des risques est abandonnée introduisant une **sous-estimation potentielle du risque**.

Estimation de l'exposition

Il s'agit d'une étape chargée d'incertitude. En effet, contrairement au domaine industriel et à un travailleur posté 8 heures par jour par exemple, l'exposition réelle des sapeurs-pompiers est imprévisible, fortement variable et donc difficile à mesurer.

La première limite est liée au protocole expérimental ayant pour objet la reproduction de feux de contenants en milieu sous-ventilé.

L'intérêt de la structure expérimentale du LCPP est de permettre une reproduction fidèle de plusieurs incendies successifs dans des conditions de développement quasi identiques. Cette répétabilité est mesurée dans l'étude pour la caractérisation de l'efficacité d'un moyen d'extinction (22).

En revanche, cette structure ne permet pas d'être représentative de l'ensemble des sinistres rencontré par les sapeurs-pompiers qui peut varier en termes de nature des combustibles ou de conditions physiques de développement du feu.

Dans le cadre de cette étude seulement deux essais réels par moyens d'extinction étudiés ont été réalisés soit quatre essais au total. Ce nombre d'essais limité ne permet pas d'obtenir une représentativité importante.

Devant cette absence de représentativité, nous pouvons analyser la variabilité des mesures d'exposition effectuées avec les mesures prises en compte dans d'autres études comparables. Les trois mémoires d'ingénieurs en sécurité sanitaire du CNAM (7–9) utilisent les mêmes ordres de grandeurs pour les concentrations des substances toxiques en phase post-extinction.

Par exemple, les concentrations moyenne et maximale de monoxyde de carbone mesurées après une extinction au moyen d'une lance traditionnelles (concentration moyenne : $63\ 000\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; concentration maximale : $128\ 000\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) sont comparables à celles utilisées dans les mémoires de Julien VALDENAIRE et Damien CHARLIER (concentrations moyennes : $50\ 000$ et $89\ 000\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; concentrations maximales : $331\ 000$ et $297\ 000\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$).

La faible représentativité de cette étude s'accorde avec l'emploi d'une méthode d'EQRS qui a pour objectif de donner des ordres de grandeur afin d'éclairer la prise de décision.

Le scénario d'exposition établi comporte également des limites.

Pour commencer seule la voie d'exposition par inhalation est prise en compte car elle est considérée comme la plus importante. Cependant les expositions par voies cutanées et orales doivent aussi être prises en compte.

L'exposition par voie cutanée des sapeurs-pompiers est bien documentée. Cette exposition est augmentée en présence d'une peau humide avec un temps de rétention du polluant plus long sur la peau et chaude occasionnant l'ouverture des pores de la peau. Le « micro-climat » que l'on retrouve au sein des tenues de feu au cours d'un incendie favorise cette double condition de chaleur et d'humidité.

Les sapeurs-pompiers peuvent être exposés par voie orale lors des périodes de remise en condition sur intervention où ils sont amenés à manger ou s'hydrater sans s'être nettoyés les mains.

La limitation de cette étude à la seule voie d'exposition par inhalation constitue une source de sous-estimation du risque.

Le scénario d'exposition limite également le temps d'exposition. Nous considérons que les sapeurs-pompiers sont exposés uniquement au cours de la phase post-extinction correspondant à la période durant laquelle le dégarnissage des parties sinistrées, le déblai et les reconnaissances sont finalisés.

Une éventuelle exposition volontaire ou accidentelle au cours de la phase d'attaque du sinistre n'est pas prise en compte.

Cette étude exclut également l'exposition chronique des sapeurs-pompiers dans leurs engins au retour d'intervention, au moment de nettoyer leurs tenues et leurs matériels au centre de secours et pour de faibles doses au quotidien dans les différents locaux. Cette exposition est principalement due au dégagement des équipements de protection individuelle contaminés par des polluants tels que des COV ou des particules de suie. Cette exposition est mesurée par Julien VALDENNAIRE et al. au moyen d'une matrice d'exposition (9). L'exclusion de cette exposition est justifiée par la mise en œuvre depuis janvier 2020 de la procédure « hygiène post-incendie » à la BSPP (Partie V – Titre C).

A l'inverse, cette étude considère que l'ensemble des sapeurs-pompiers ne protègent pas leurs voies aériennes au cours de la phase post-extinction malgré la recommandation notifiée dans leur règlement opérationnel. La généralisation de cette pratique ne peut être considérée comme la vérité mais s'impose en qualité de scénario protecteur devant une absence de données plus précises (surestimation du risque).

Enfin, il est décidé d'utiliser les valeurs maximales mesurées dans le cadre de l'évaluation des risques associés aux effets sans seuil. Ce scénario est le plus critique et peut donc occasionner une surestimation du risque.

Nous constatons donc que le scénario d'exposition présente des incertitudes, facteurs de sous-estimations ou de surestimations du risque.

Enfin, le scénario d'exposition ne prend pas en compte les éventuels effets cumulés liés aux poly-expositions rencontrées dans le métier de sapeur-pompier. En effet tout au long de leur carrière ces militaires peuvent être exposés simultanément à des nuisances chimiques, biologiques ou physiques. Par exemple le travail posté de nuit est classé par le CIRC comme un agent « probablement cancérigène » chez l'homme depuis 2007 (groupe 2A).

Les connaissances méthodologiques actuelles sont insuffisantes pour prendre en compte ces poly-expositions.

C. Préconisations

La principale préconisation découle directement des conclusions pouvant être tirées de cette étude.

En démontrant de manière quantitative l'aspect « protecteur » de la brumisation en terme d'impact sanitaire lié à la toxicité des fumées, **le BSPP doit poursuivre ses tests afin d'envisager le remplacement à moyen terme des moyens d'extinction traditionnels par la brumisation diphasique si ses capacités d'extinction sont confirmées.**

Afin de diminuer et de gérer l'exposition actuelle aux fumées d'incendie, ainsi que l'exposition résiduelle qui demeurerait malgré l'emploi de la brumisation, des actions de prévention doivent être mises en place.

Le rapport de l'ANSES publié en 2019 rassemble l'ensemble des risques sanitaires liés aux expositions professionnelles des sapeurs-pompiers (4). On retrouve dans ce rapport de nombreuses recommandations liées à la prise en compte des fumées d'incendie, provenant du rapport de la CNRACL publié en 2017 (2) ainsi que du guide de la DGSCGC publié en 2018 (3). Les préconisations ci-dessous reprennent une partie de ces recommandations nationales.

Avant l'intervention – au quotidien.

Les sapeurs-pompiers de Paris doivent être informés et sensibilisés.

Un changement de culture doit être mené au sein de cette population. Les traces de suie et l'odeur de fumée sont encore aujourd'hui associées à un engagement courageux et brave.

Il faut donc sensibiliser ces sapeurs-pompiers aux effets aigus et chroniques liés à cette exposition et les former aux règles d'hygiène leur permettant de préserver leur santé (lavage des mains, du visage, douche...)

Une association simple entre l'odeur de fumée que l'on peut fréquemment retrouver dans les casernements, les engins ou sur les tenues avec la notion de « contamination chimique » doit être introduite.

Il est nécessaire de surveiller et dépister les effets indésirables liés à cette exposition.

S'agissant d'une population à risque une surveillance médicale doit être mise en place. Au-delà de la gestion de l'aptitude physique des sapeurs-pompiers de Paris, cette surveillance médicale doit être spécifiquement renforcée sur la survenue de maladie liée à l'exposition aux fumées et intégrer la sensibilisation de cette population aux risques chroniques.

De plus, cette surveillance médicale s'arrête actuellement à la fin de leur parcours au sein de l'institution. La poursuite d'un suivi médical au-delà de cette période permettrait de suivre l'apparition d'effets à longs termes tels que les cancers. Ce suivi est particulièrement nécessaire lorsque le personnel quitte l'institution pour continuer à exercer le métier de sapeur-pompier sous un autre statut (fonctionnaire territorial, entreprise privée). Enfin, ce suivi médical devrait également comprendre la période post-professionnelle.

La création et le suivi d'une cohorte de sapeurs-pompiers de Paris par un observatoire épidémiologique, dans la poursuite de travaux antérieurs réalisés par Sophie Deschamps, Isabelle Momas et Bernard Festy (6), permettrait de disposer de données plus précises sur les effets liés à cette exposition.

Afin de préciser l'exposition des sapeurs-pompiers de Paris, il serait de plus nécessaire de réaliser une campagne de mesures sur un large spectre de substances toxiques avec des moyens de prélèvements portés directement sur les intervenants au cours de réelles interventions. Cette campagne permettrait de disposer d'éléments plus précis sur la nature des substances toxiques l'importance, la fréquence et la durée d'exposition des sapeurs-pompiers de Paris.

Au cours de l'intervention.

Sur les lieux de l'incendie les principales actions de prévention consistent à agir sur l'organisation.

Tout incendie doit être considéré comme une intervention à caractère chimique avec un risque d'exposition à différents agents potentiellement toxiques, cancérigènes... Conformément à l'engagement associé à un risque chimique un zonage de l'espace doit donc être mis en place avec des niveaux de protection gradués en fonction du risque.

Au cours des différentes phases de lutte contre l'incendie une « zone d'exclusion » doit donc être définie ; il s'agit de la zone où l'on suppose qu'un risque de contamination ou d'exposition aux agents toxiques est présent. Cette zone existe également au cours des phases passives de l'intervention durant lesquelles les opérations de déblai, dégarnissage ou de surveillance sont menées.

Dans cette zone d'exclusion le niveau de protection des personnels doit être maximal avec le port complet des protections cutanées (dont la cagoule et les gants) et une protection respiratoire assurée par l'appareil respiratoire isolant (ARI).

En pratique il est observé que le port de l'ARI est bien intégré lors de la phase active de lutte contre l'incendie mais cela ne se confirme pas au cours de la phase passive de déblai ou de surveillance. C'est donc sur cette déviance due à l'encombrement et au poids de l'appareil que l'effort doit être porté.

La mise en place d'outils de mesures portatifs instantanés pour les substances considérées comme « traceuses » du risque toxique permettrait de déterminer une qualité d'air « suffisante » (définie par des valeurs guides) pour ôter l'ARI ou le remplacer par d'autres appareils de protection tels que des masques FFP 3, FFP 2 (Filtering Facepiece Particles de niveau 3 ou 2), des masques avec des filtres à charbon actif... Ces appareils de mesures permettraient ainsi de définir plus précisément le zonage de l'intervention.

Afin de favoriser l'engagement d'équipes en sécurité pour la phase de déblai il pourrait être envisageable de généraliser la demande d'un ou plusieurs engins exclusivement pour cette mission. Cette demande effectuée par le commandant des opérations de secours (COS) à l'issue de la phase active permettrait de disposer d'équipes parfaitement optimales porteuses de tenues non contaminées et non humides et surtout enclines à porter l'ARI tout au long de cette phase laborieuse.

Les résultats observés dans cette étude avec l'emploi d'un brouillard d'eau pour lutter contre un incendie permettent de supposer que l'emploi de ce brouillard au cours des phases post-extinction pourrait avoir des effets bénéfiques sur la concentration des substances toxiques.

Du fait du faible débit de ce type de lance le brouillard d'eau pourrait être mis en œuvre alternativement ou de façon continue sans que cela entraîne des effets néfastes sur le bâtiment.

Le COS doit organiser de manière systématique une zone de soutien permettant la remise en condition du personnel et surtout une décontamination primaire des intervenants. Afin d'éviter une concentration de la toxicité cette zone de décontamination doit être située à l'air libre.

Cette décontamination primaire consiste à enlever la tenue de protection en dehors de cette zone de soutien en conservant une protection respiratoire et de se laver le visage, le cou et les mains. Cette étape est essentielle avant de s'hydrater ou de se restaurer.

Après l'intervention.

Après l'incendie une organisation adaptée doit permettre la gestion de la contamination.

La méthode Skelleftea élaborée en 2006 par les services d'incendie et de secours suédois est appliquée depuis janvier 2020 dans l'ensemble des centres de secours de la BSPP à travers la procédure « hygiène post-incendie ».

Cette procédure est la continuité de la décontamination primaire ayant lieu au cours de l'intervention. Il s'agit d'éviter un transfert de contamination à travers un protocole précis dont les principales actions suivent :

- tout le matériel contaminé doit être prélevé sur les lieux de l'intervention et stocké en dehors des cabines des engins,
- les tenues de protection contaminées doivent être stockées en dehors des cabines des engins, entreposées ensuite dans une zone permettant leur désorption (sans risque de contamination des locaux de vie) puis mis au lavage,
- toutes les opérations de nettoyage du matériel ou des tenues de protection doivent être effectuées avec des équipements de protection adaptés (gants, protection respiratoire...)
- après toute intervention pour feu chaque intervenant doit mettre sa tenue de travail au lavage (y compris la cagoule et les sous-vêtements) et prendre immédiatement une douche
- interdire l'accès aux locaux de vie des centres de secours avant que les personnels soient lavés et changés.

VI. Conclusion

A travers cette étude nous sommes en mesure de répondre à la problématique initiale relative à l'impact sanitaire pouvant être attendu avec l'intégration d'un nouveau moyen d'extinction à la BSPP : la lance diphasique produisant un brouillard d'eau basse pression.

La réponse à cette problématique comprend une première phase expérimentale visant à mesurer la concentration de différents polluants présents dans les fumées d'incendie lors de l'usage d'une lance traditionnelle et lors de l'emploi de la brumisation. Ces mesures sont obtenues en collaboration avec le LCPP dans une structure permettant de reproduire des feux de contenants.

L'impact sanitaire lié à l'exposition des sapeurs-pompiers de Paris aux fumées incendie est ensuite estimé de manière quantifiée au moyen d'une EQRS. L'identification des dangers permet de retenir plusieurs produits gazeux ou particulaires parmi lesquels on retrouve des COV dont le benzène et le formaldéhyde, 12 HAP dont le benzo(a)pyrène ainsi que le monoxyde de carbone et la fraction inhalable des particules en suspension.

Cette EQRS prend en compte uniquement l'exposition des sapeurs-pompiers par inhalation durant la phase post-extinction au cours de laquelle le port des appareils de protection respiratoire n'est pas généralisé.

L'impact sanitaire comprend des effets aigus pour des expositions maximales de courtes durées et des effets chroniques avec seuils de dose pour des expositions moyennes de longues durées. Nous retrouvons parmi les polluants étudiés des produits ayant un potentiel cancérigène initiateur ce qui nécessite la prise en compte également des effets sans seuil de dose. Pour la quantification de ces derniers effets une matrice d'exposition est construite afin de déterminer la durée d'exposition « vie entière » des sapeurs-pompiers de Paris.

Cette étude met en évidence l'aspect « protecteur » de la brumisation. L'utilisation de ce moyen d'extinction diminue l'impact sanitaire lié à l'exposition des sapeurs-pompiers de Paris aux polluants atmosphériques, par inhalation et en phase « post-extinction ».

En effet, pour l'ensemble des produits toxiques étudiés, quel que soit le type d'effets (aigus ou chroniques, avec ou sans seuil), l'impact sanitaire est diminué lors de l'emploi de cette nouvelle lance. Cette diminution est de l'ordre d'un facteur de réduction allant de 1,5 à 15 et permet pour certaines substances de mettre le sapeur-pompier hors de danger avec une exposition en dessous de la valeur toxicologique de référence (effets à seuil de dose).

Quel que soit le moyen d'extinction employé le risque demeure présent et associé particulièrement à la présence de benzène, de formaldéhyde, de monoxyde de carbone et de particules en suspension.

Le risque d'apparition de cancer en excès est limité mais ne peut pas être considéré acceptable avec des excès de risque de l'ordre de $1,0E-5$, soit une chance sur 100 000 de déclencher un cancer en lien avec cette exposition.

La principale préconisation de ce mémoire est de poursuivre l'expérimentation relative à la brumisation et envisager à moyen terme qu'elle remplace les moyens d'extinctions traditionnels.

A court terme, il est nécessaire de poursuivre le changement culturel au sein de cette profession en considérant le risque comme omniprésent et en leur donnant les moyens techniques et organisationnels pour se protéger de ce risque tout au long de l'intervention.

L'EQRS menée dans cette étude permet d'éclairer les choix des décideurs. Les différents résultats doivent cependant être analysés avec prudence en prenant en compte les incertitudes et les limites discutées dans la dernière partie.

VII. Bibliographie

1. International Agency For Research on Cancer Monograph Working Group. Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans - painting, firefighting and shiftwork. 2007.
2. CNRACL. Impact et prévention des risques relatifs aux fumées d'incendie pour les sapeurs-pompiers. 2017.
3. DGSCGC - Ministère de l'Intérieur. Guide de doctrine relatif à la prévention contre les risques de toxicité liés aux fumées d'incendie. 2018.
4. ANSES. Risques sanitaires liés aux expositions professionnelles des sapeurs-pompiers. août 2019.
5. Jalilian H., Ziaei M., Weiderpass E., Rueegg C., Khosravi Y., Kjaerheim K. Cancer incidence and mortality among firefighters. *Int J Cancer*. janv 2019;
6. Sophie Deschamps, Isabelle Momas, Bernard Festy. Mortality amongst Paris fire-fighters [Internet]. *European journal of epidemiology*; 1996. Disponible sur : DOI : 10.1136/oemed-2013-101803
7. Jérôme Lanfranca. 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. CNAM Paris; 2016.
8. Damien Charlier. Impact sanitaire, chez les sapeurs-pompiers de Paris, de l'exposition chronique aux polluants atmosphériques lors des phases post extinction des feux de contenants. CNAM Paris; 2015.
9. Valdenaire J, Rieunier F, Testa F, Temime L. Évaluation des bénéfices potentiels d'un nouveau mode d'action pour les pompiers de Paris, l'attaque d'atténuation, à partir d'une évaluation quantitative des risques. *Arch Mal Prof Environ* [Internet]. 2020; Disponible sur: <https://doi.org/10.1016/j.admp.2019.11.001>
10. Julien Gsell. Etude des capacités d'extinction des feux au moyen du brouillard d'eau. Univ Ulst. 2010;
11. Andersson P., Holmstedt G. Limitations of Water Mist as a Total Flooding Agent. *J Fire Prot Eng*. 1998;
12. Bazin H, Thiry A, Suzanne M, Bellivier A, Faure E, Dreuille N, et al. Expérimentations de feux réels dans un immeuble d'habitation. Laboratoire central de la préfecture de police; 2008.
13. Centre d'étude des tunnels. Les brouillards d'eau dans les tunnels routiers. Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer; 2010.
14. INVS, AFSSET. Estimation de l'impact sanitaire d'une pollution environnementale et évaluation quantitative des risques sanitaires. 2017.
15. Guillaume E. Effets du feu sur les personnels. Lab Natl Métrologie Essais. Juillet 2006;
16. Nicolas Struski. Compréhension du système feu - autopsie d'une meurtrière. 2019.
17. ISO. ISO 13943 - Sécurité au feu - Vocabulaire. 2017.
18. ANSES. Évaluation des risques liés à l'exposition aux retardateurs de flamme dans les meubles rembourrés. 2015 sept.

19. BSPP. Règlement sur l'Organisation et le Fonctionnement du Service d'Incendie et de Secours. 2019.
20. BSPP. Rapport d'activités 2018.
21. Guénaël THIAULT, Fanny RIEUNIER. Evaluation de l'efficacité de la lance diphasique sur l'émission de polluants gazeux et particulaires - Rapport n°19/2484/PR2/R19. LCPP; 2019.
22. Mathieu SUZANNE, Fabian TESTA, Zoubir ACEM, Pascal BOULET, Bruno COUDOUR. Caractérisation de l'Efficacité d'un Moyen Mobile d'Extinction. 2018.
23. INRS. Fiche toxicologique n°49 - benzène. 2011.
24. INRS. Fiche toxicologique n°74 - toluène. 2012.
25. INRS. Fiche toxicologique n°266 - éthylbenzène. 2018.
26. INRS. Fiche toxicologique n°77 - xylènes. 2009.
27. INRS. Fiche toxicologique n°223 - mésitylène. 2004.
28. INRS. Fiche toxicologique n°2 - styrène. 2016.
29. INRS. Fiche toxicologique n°204 - naphtalène. 2007.
30. INRS. Fiche toxicologique n°7 - acide formique et solutions aqueuses. 2019.
31. INRS. Fiche toxicologique n°120 - acétaldéhyde. 2004.
32. INRS. Fiche toxicologique n°144 - benzo(a)pyrène. 2007.
33. INRS. Fiche toxicologique n°47 - monoxyde de carbone. 2009.
34. INRS. Fiche toxicologique n°264 - noir de carbone. 2007.
35. Blandine DOORNAERT, Annick PICHARD. Hydrocarbure Aromatiques Polycycliques - évaluation de la relation dose-réponse pour des effets cancérigènes. INERIS; 2003.
36. AFSSET. Valeurs guides de qualité d'air intérieur - le monoxyde de carbone. 2007.
37. Deutsche Forschungsgemeinschaft. List of MAK and BAT values 2018.
38. AFSSET. Recommandations pour la qualité de l'air dans les parcs de stationnement couverts. 2007.
39. US-EPA. Regional Removal Management Levels (RMLs) User's Guide. 2019.
40. Ministère de l'écologie et du développement durable. Circulaire relative aux sites et sols pollués - bulletin officiel n° 2007/13. 2007.

VIII. Liste des tableaux et figures

Liste des tableaux

Tableau 1 : âges et anciennetés moyens par grades de la population étudiée (sources BORH - 2019)	18
Tableau 2 : Temps d'Engagements Opérationnels annuels par grade (sources BPO – année 2018)	18
Tableau 3 : méthode de prélèvements des substances constituant les fumées d'incendie.	20
Tableau 4 : identification des dangers pour les expositions aux COV par inhalation.	22
Tableau 5 : classement CIRC des 12 HAP mesurés.	23
Tableau 6 : effets aigus du CO en fonction de son taux dans l'air.	24
Tableau 7 : sélection des VTR pour les effets aigus à seuil (expositions par inhalation).	29
Tableau 8 : sélection des VTR pour les effets chroniques à seuil (expositions par inhalation).	30
Tableau 9 : sélection des VTR pour les effets chroniques sans seuil (expositions par inhalation).	31
Tableau 10 : estimation de l'exposition vie entière des sapeurs-pompier de Paris.	32
Tableau 11 : concentrations en polluants mesurées dans le cadre des essais.	33
Tableau 12 : caractérisation du risque pour les effets toxiques aigus à seuil.	35
Tableau 13 : caractérisation du risque pour les effets toxiques chroniques à seuil.	37
Tableau 14 : caractérisation du risque pour les effets toxiques sans seuil chez les Adjudants-chefs.	39
Tableau 15 : excès de risques cumulés.	41

Liste des figures

Figure 1 : organisation territoriale de la BSPP.	8
Figure 2 : nomenclature des différents types de jets dépendant de leur taille de gouttes caractéristique.	11
Figure 3 : vue schématique de la structure expérimentale.	19
Figure 4 : processus de formation des particules de suies.	24
Figure 5 : schéma représentant l'ordre de grandeur des particules (source : US-EPA)	25
Figure 6 : définition des fractions de pénétration des particules.	26
Figure 7 : courbes conventionnelles de pénétration des particules.	26
Figure 8 : logigramme – choix des Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR).	27
Figure 9 : caractérisation du risque pour les effets aigus avec seuil.	36
Figure 10 : caractérisation du risque pour les effets chroniques avec seuil.	37
Figure 11 : caractérisation du risque pour les effets sans seuil chez les adjudants-chefs.	40
Figure 12 : excès de risque individuels tous polluants cumulés par grade.	42