

Évaluation des bénéfices potentiels liés à l'utilisation d'un brouillard d'eau basse pression dans la lutte contre les incendies chez les sapeurs-pompiers de Paris, à partir d'une évaluation quantitative des risques

J. Dirand, F. Rieunier, F. Testa, L. Temime

▶ **To cite this version:**

J. Dirand, F. Rieunier, F. Testa, L. Temime. Évaluation des bénéfices potentiels liés à l'utilisation d'un brouillard d'eau basse pression dans la lutte contre les incendies chez les sapeurs-pompiers de Paris, à partir d'une évaluation quantitative des risques. Archives des Maladies Professionnelles et de L'Environnement, 2021, 82 (6), pp.601-613. 10.1016/j.admp.2021.07.007 . hal-03615121

HAL Id: hal-03615121
https://cnam.hal.science/hal-03615121

Submitted on 28 Feb 2023

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

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

Copyright

Evaluating the potential benefits of the use of water-mist system in fire fighting operations for Paris firefighters, through quantitative risk assessment.

Evaluation des bénéfices potentiels liés à l'utilisation d'un brouillard d'eau basse pression dans la lutte contre les incendies chez les sapeurs-pompiers de Paris, à partir d'une évaluation quantitative des risques.

J.Diranda

F.Rieunier

F.Testa

L.Temime

Summary

Objectives – Changes in residential building design and the use of new construction materials are introducing new risks to firefighters, including increased smoke toxicity.

A water-mist system produced by hydropneumatic fragmentation in firefighting operations could reduce the exposure to toxic smoke. The purpose of this study is to assess the potential health benefits for firefighters of such a water-mist system on smoke exposure during the post-extinction phase (dedicated to excavating operations).

Methods - The different pollutants present during the post-extinction phase were identified and their concentrations measured in an experimental context. Then we estimated the duration of occupational exposure of firefighters to these pollutants through an exposure matrix. Finally, using a quantitative health risk assessment approach, we compared the risks associated with smoke exposure in the context of a conventional attack with those associated with the use of a water-mist system.

Results – With the use of traditional firefighting equipment, our study shows an excess cancer risk of up to 1,3/100 000 depending on the rank of the firefighters studied, as well as hazard quotients well above 1 for non-cancer effects. The use of a water-mist fire-fighting system allows to reduce the excess risk of cancer to below 2,6/1 000 000. However, despite the use of this new extinction method, the non-cancer risk level remains high for some toxic substances.

Conclusions - It is necessary to implement preventive actions to reduce the exposure of firefighters to toxic smokes and its health impact. This study shows that innovative firefighting approaches, such as a water-mist firefighting system, could lead to positive results.

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

Résumé

Objectifs - 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 produit par fragmentation hydropneumatique pour lutter contre l'incendie pourrait réduire l'exposition à ces fumées.

L'objectif de cette étude est d'évaluer les bénéfices sanitaires potentiels pour les sapeurs-pompiers d'un tel brouillard d'eau sur l'exposition aux fumées au cours de la phase « post-extinction » (dédiée aux opérations de déblai).

Méthodes – Les différents polluants présents au cours de la phase « post-extinction » ont été identifiés et leurs concentrations mesurées dans un cadre expérimental. Ensuite, le temps d'exposition professionnelle des sapeurs-pompiers à ces polluants a été estimé à travers une matrice d'exposition. Enfin, une approche d'évaluation quantitative des risques sanitaires a permis de comparer les risques liés à l'exposition aux fumées dans le cadre d'une attaque classique à ceux liés à l'utilisation d'un brouillard d'eau.

Résultats – Avec l'emploi de moyens d'extinction traditionnels, notre étude met en évidence un risque de cancer en excès montant jusqu'à 1,3 / 100 000 en fonction du grade des sapeurs-pompiers étudiés, ainsi que des quotients de danger largement supérieurs à 1 pour les effets non cancérigènes. Le brouillard d'eau a un effet protecteur, permettant notamment de réduire l'excès de risque de cancer en-dessous de 2,6 / 1 000 000. Cependant, malgré l'usage de ce nouveau moyen d'extinction, le niveau de risque hors cancer demeure élevé pour certaines substances toxiques.

Conclusions - Il est nécessaire de mettre en place des actions de prévention afin de diminuer l'exposition aux fumées d'incendie des sapeurs-pompiers et ses impacts sanitaires. Cette étude montre que l'emploi de nouveaux moyens d'extinction tels que la brumisation est une piste intéressante.

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

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.

Une association possible entre cette exposition et le développement de cancers a été établie en 2007 par le centre international de recherche sur le cancer (CIRC) (1). Deux études internationales publiées en 2020 confirment cette association (2)(3). Différentes revues de la littérature épidémiologique internationale permettent également de préciser cet impact sanitaire chez les sapeurs-pompiers (4)(5)(6).

En France, la publication d'un rapport de la caisse nationale de retraites des agents des collectivités locales (CNRACL) en 2017 (7) et d'un guide de doctrine opérationnelle de la direction générale de la sécurité civile et de la gestion des crises (DGSCGC) actualisé en septembre 2020 (8), 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) 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, on 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), la BSPP doit s'assurer que ce nouveau moyen d'extinction est moins dangereux que la technique préexistante.

Cet article reprend les résultats d'une évaluation quantitative des risques sanitaires (EQRS) réalisée dans le cadre d'un mémoire d'ingénieur en gestion des risques du Conservatoire national des arts et métiers (Cnam). Son objectif était de déterminer dans quelle mesure l'utilisation de ce nouveau moyen d'extinction pouvait diminuer l'impact sanitaire lié à l'exposition des sapeurs-pompiers de Paris aux polluants atmosphériques, par inhalation en phase « post extinction ».

Matériel et méthodes

Principe de l'EQRS

L'évaluation quantitative du risque sanitaire (EQRS) a été formalisée en 1983 par le National Research Council (NRC) des États-Unis (9). 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.

L'EQRS emploie une méthodologie en quatre étapes :

- 1ère étape : identification des dangers. Les substances ou agents dangereux sont répertoriés. Pour chacun d'entre eux les potentiels effets sanitaires indésirables sont recherchés.
- 2ème étape : sélection des valeurs toxicologiques de référence (VTR). Ces valeurs correspondent à la relation quantitative qui existe entre l'exposition et l'apparition probable d'un effet sanitaire. Les VTR sont spécifiques d'un effet (généralement l'effet critique, le premier à se manifester après exposition), d'une durée d'exposition (aigue, continue ou répétée) et d'une voie d'exposition.
- 3ème étape : estimation de l'exposition. On cherche tout d'abord à déterminer la dose de polluant qui arrive au contact de l'organisme ou qui y pénètre. 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 avec des mesures de concentration dans l'air.

  Ces premiers résultats sont combinés à des données temporelles relatives aux fréquences d'expositions, mais également à la durée cumulée d'exposition sur une vie entière ; il s'agit des « scénarios d'expositions ».
- 4ème étape : 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.

Réalisation de l'EQRS

La 1ère étape consiste à identifier les substances sur lesquelles l'EQRS va se concentrer. La fumée d'incendie est composée de l'ensemble des gaz et des aérosols, y compris les particules

en suspension, créés par la combustion ou la pyrolyse d'un feu. On dénombre ainsi dans la littérature scientifique plus de 200 produits de décomposition pouvant être retrouvés dans ces fumées. La plupart de ces substances sont toxiques, irritantes ou asphyxiantes (10).

Dans le cadre de cette étude, nous avons choisi de retenir les principaux traceurs représentatifs des phénomènes de combustion, ayant une toxicité établie, des données toxicologiques disponibles et pour lesquels la mesure de concentrations lors d'incendie était faisable.

Pour chacune de ces substances, l'identification des dangers consiste également à déterminer les voies d'expositions et les effets toxiques associés.

Pour chacune des substances retenues, nous avons réalisé une recherche de valeurs toxicologiques de références (VTR). Deux bases de données ont été utilisées dans le cadre de ces recherches : le portail des substances chimiques de l'institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS) (*https://substances.ineris.fr/fr/)* et la base de données canadiennes TERA[1] (*https://www.tera.org/iter/*).

Afin de sélectionner les VTR à retenir dans le cadre de cette EQRS nous avons appliqué la méthodologie proposée par l'INERIS (11), tout en prenant en compte les recommandations de l'agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES). Les critères de sélection étaient la date de publication, l'origine des données (animale ou humaine) et la qualité de la justification scientifique. Devant une difficulté de sélection, la valeur numérique la plus conservatoire pour la santé a systématiquement été retenue.

L'estimation de l'exposition nécessite d'en définir précisément les circonstances à travers un scénario d'exposition. Dans le cadre de cette étude, et conformément aux observations faites

[1] TERA : toxicology excellence for risk assessment.

par l'ANSES dans son dernier rapport relatif aux expositions professionnelles des sapeurs-pompiers, nous observons que la phase post-extinction est la plus critique (12). En effet, il a été constaté que les sapeurs-pompiers retirent dans la majeure partie des cas leurs protections respiratoires (fatigue, manque d'ergonomie ou d'autonomie, poids…) au cours de cette phase (7). Celle-ci débute lorsque l'incendie est éteint et se constitue d'opérations de déblais, de dégarnissage, de protection et de surveillance.

Cette étude se concentre donc sur l'estimation de l'exposition aux fumées d'incendie uniquement au cours de la phase post-extinction. Pour cela une campagne de mesures a été effectuée par la BSPP en collaboration avec le laboratoire central de la préfecture de police (LCPP) dans une structure expérimentale garantissant une répétabilité suffisante (13). Ces mesures consistaient à réaliser des prélèvements des principaux composés émis par les fumées d'incendie et résiduels lors des phases d'extinctions menées au moyen d'une lance traditionnelle ou au moyen d'une lance de brumisation diphasique.

L'estimation de l'exposition nécessite également de déterminer la durée d'exposition au cours de la vie du sapeur-pompier : le temps d'engagement opérationnel (TEO) vie entière en phase post-extinction. A l'aide des différents bureaux métiers de la BSPP, une matrice d'exposition a pu être établie à partir du TEO par grade enregistré informatiquement au cours de l'année 2019 et en prenant en compte le nombre moyen d'années passées dans chacun des grades (les sapeurs-pompiers de Paris occupent successivement les différents grades présentés dans le tableau 1, de sapeur à adjudant-chef, hormis les lieutenants qui constituent une catégorie spécifique). Le tableau 1 présente cette matrice d'exposition en fonction du grade.

La dernière étape consiste à caractériser le risque à partir des données recueillies dans les trois étapes précédentes. La méthode de caractérisation des risques nécessite de dissocier deux types d'effets toxiques : les effets avec seuil de dose et les effets 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 (Ci^M) sur la VTR.

La concentration inhalée est la concentration maximale mesurée pour l'évaluation des effets aigus et la concentration moyenne mesurée pour l'évaluation des 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, qui seront ici les effets cancérigènes, on calcule l'excès de risque individuel (ERI), c'est-à-dire le sur-risque individuel de cancer chez un individu exposé, dû à son exposition au cours d'une vie entière.

On obtient l'ERI à partir de l'excès de risque unitaire (ERU : VTR pour les effets sans seuil), de la durée totale d'exposition d'une population rapportée à la durée de la vie entière, et de la concentration moyenne de polluant inhalée (Ci) lors des périodes d'exposition.

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

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.

Ces résultats peuvent être comparés à des niveaux de risque couramment utilisés comme seuils décisionnels. Ainsi, en France, le seuil d'ERI de 10^{-5} (une chance en excès sur 100 000 d'être atteint par un cancer) est régulièrement cité, comme par exemple dans la circulaire relative à la gestion des sols pollués (14).

Résultats

Identification des dangers

23 substances toxiques ont été prises en compte dans cette étude. Elles correspondent aux principaux traceurs des phénomènes de combustion : composés organiques volatils (COV), hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), monoxyde de carbone et fraction inhalable des particules en suspension (tableau 2).

Seule la voie d'exposition par inhalation a été 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 en phase post-extinction.

Le tableau 2 présente les différents effets toxiques recensés pour une exposition par inhalation aux substances retenues.

- leurs toxicités aigües dans le cadre d'une exposition maximale de courte durée,
- leurs toxicités chroniques (hors cancers) pour une exposition de plusieurs années,
- leurs effets cancérogènes du fait du classement de « la lutte contre l'incendie » comme probablement cancérigène pour l'Homme (Groupe 2B) par le CIRC (1).

Choix des VTR

Les VTR retenues en fonction des effets toxiques sont détaillées dans les tableaux 3, 4 et 5. Les substances pour lesquelles aucune VTR n'est disponible ont été retirées des tableaux.

Estimation des expositions.

Le tableau 6 présente les concentrations maximales et moyennes en substances toxiques observées lors de la campagne de mesures au cours de la phase post-extinction, à l'issue d'une extinction menée soit au moyen d'une lance traditionnelle, soit au moyen d'une lance de brumisation diphasique.

Caractérisation des risques :

1 – caractérisation des risques pour les effets aigus avec seuil

La figure 1 résume les principaux niveaux de risques associés aux effets aigus de l'exposition aux fumées d'incendie lors de la phase post-extinction et permet une comparaison visuelle des risques avec une lance traditionnelle et avec la brumisation. Pour cette figure, seules les substances pour lesquelles l'un des QD est supérieur à 1 sont présentées.

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 (de 48 à 3,6) et à l'acétaldéhyde (de 1,2 à 0,1) et d'un facteur d'environ 5 pour le benzène (de 50 à 7,7) et le monoxyde de carbone (de 1,3 à 0,3).

Malgré cette diminution avec l'emploi de la brumisation, l'exposition aigue au benzène et au formaldéhyde demeure préoccupante avec des QD supérieurs à 1.

2 – caractérisation des risques pour les effets chroniques avec seuil.

La figure 2 résume les principaux niveaux de risques et permet une comparaison visuelle des risques avec une lance traditionnelle et avec la brumisation. Pour cette figure, seules les substances pour lesquelles l'un des QD est supérieur ou proche de 1 sont présentées.

Cette caractérisation du risque permet de constater que le risque lié à l'exposition aux fumées d'incendie est très élevé pour les effets chroniques à seuil, avec des concentrations 275 fois supérieures à la VTR pour le benzo(a)pyrène, 150 fois pour le formaldéhyde et 81 pour le benzène.

L'usage de la brumisation permet de réduire ce risque par rapport à l'usage de la lance traditionnelle. Cette diminution des QD est très importante pour l'exposition au

benzo(a)pyrène (de 275 à 6), au formaldéhyde (de 150 à 10) et à l'acétaldéhyde (de 11,8 à 0,9). Cependant, même avec la brumisation, le risque reste élevé avec des QD au-dessus de 1 pour le benzène, le formaldéhyde, le benzo(a)pyrène, le monoxyde de carbone et les particules de suie (fraction inhalable).

3 – caractérisation des risques pour les effets sans seuil.

Pour les effets sans seuil, c'est l'exposition sur la vie entière qui est considérée. Les adjudants-chefs constituent la population connaissant la plus grande durée d'exposition aux fumées d'incendie au cours de leur vie. Il en découle l'excès de risque individuel (ERI) le plus élevé parmi les différentes populations étudiées. Aussi, les résultats détaillés par polluant concernant ces ERI ne sont présentés dans le cadre de cet article que pour les adjudants-chefs (figure 3). La figure 3 permet également de comparer les risques avec l'emploi d'une lance traditionnelle et avec la brumisation.

L'ensemble des ERI évalués sont inférieurs à 10^{-5}, c'est-à-dire un excès de risque inférieur à 1 chance sur 100 000 de déclencher un cancer en lien avec cette exposition.

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 par exemple près de 40 fois moins important avec l'emploi de la brumisation comparé avec l'emploi d'une lance traditionnelle.

Conformément aux recommandations de l'InVS et de l'Afsset (15), 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 cancérigène global. La figure 4 présente cette sommation pour les fumées d'incendie en fonction du grade.

On peut observer que l'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 $1{,}3.10^{-5}$ avec une lance traditionnelle (soit 1,3 chances sur 100 000 sur une vie entière de développer un cancer à cause de l'exposition aux fumées d'incendie) à $2{,}6.10^{-6}$ si cette lance est remplacée par la brumisation (soit 2,6 chances sur un million de développer un cancer à cause de l'exposition aux fumées d'incendie).

Avec la brumisation, tous les ERI cumulés sont inférieurs à 10^{-5}, un niveau de risque de cancer considéré comme faible en milieu professionnel au regard des doctrines décisionnelles d'organismes internationaux tels que l'Institut américain de santé-sécurité au travail (NIOSH) (16).

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

$$ERC = ERI \times Effectif\ dans\ le\ grade$$

Pour l'ensemble de la population étudiée, constituée des 4 375 sapeurs-pompiers de Paris en service opérationnel d'incendie et de secours, cet ERC est égal à 0,019 cas de cancer en excès. Cet ERC n'est plus que 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.

Discussion

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 pourrait jouer un rôle protecteur dans le cadre de l'exposition des sapeurs-pompiers de Paris aux fumées d'incendie en phase post-extinction. En particulier, l'usage de la brumisation permettrait de faire passer en-dessous de 1 les quotients de danger associés à plusieurs des polluants présents dans les fumées d'incendie, protégeant ainsi les sapeurs-pompiers des effets toxiques aigus et chroniques correspondants.

Cet effet « protecteur » de la brumisation est cohérent avec les premières observations relevées dans la littérature scientifique (17)(18). La diminution de concentration des polluants obtenue avec la brumisation 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 l'exposition aux fumées d'incendie :

- Deux COV et un HAP sont particulièrement préoccupants pour les effets aigus et les effets chroniques avec seuil de dose : le benzène, le formaldéhyde et le benzo(a)pyrène,
    - 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 275 pour les effets chroniques à seuil,
    - lors de l'utilisation de la brumisation, le risque 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 10^{-5}, parfois considéré comme un seuil d'action. 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 aigues et chroniques au benzène, au formaldéhyde et au benzo(a)pyrène et ceci quel que soit le moyen d'extinction employé. De plus, 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).

Limites

L'EQRS 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. En ne prenant en compte qu'une vingtaine de substances parmi les 200 produits toxiques dénombrés dans les fumées d'incendie et en omettant d'étudier l'éventuel « effet cocktail » provoqué par ce type de mélange toxique, on peut supposer une sous-estimation du risque lié à l'identification des dangers.

L'emploi de facteurs de sécurité dans l'élaboration des VTR et l'utilisation de valeurs guides en l'absence de VTR peut occasionner une surestimation du risque.

L'utilisation d'une matrice d'exposition (excluant les situations spécifiques où par exemple un militaire du rang poursuit une carrière longue sans gravir les échelons), l'élaboration d'un scénario centré sur l'unique phase post-extinction et la réalisation d'une campagne de mesures non représentative de l'ensemble des incendies rencontrés par les sapeurs-pompiers, sont également des sources d'incertitude dans cette étude.

Recommandations

Notre étude, qui démontre de manière quantitative les bénéfices sanitaires potentiels de la brumisation sur l'impact de l'exposition aux fumées, justifie que la BSPP poursuive 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.

En parallèle, 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. La première mesure consisterait à s'assurer que les sapeurs-pompiers évoluent en sécurité au cours de la phase post-extinction. Cela peut nécessiter des actions de sensibilisation et de formation, mais également la mise en œuvre d'appareils de protection des voies respiratoires moins contraignants, ou l'organisation de relèves au début de cette phase afin de disposer de personnels au potentiel physique non entamé et enclins à porter les appareils de protection.

La méthode de décontamination des tenues et des personnels à l'issue des incendies doit également poursuivre sa montée en puissance au sein des services d'incendie et de secours français.

De manière plus générale, il est nécessaire de poursuivre le changement culturel au sein de cette profession en considérant le risque comme omniprésent et en se donnant les moyens techniques et organisationnels pour se protéger des risques sanitaires tout au long des interventions.

Références :

1. IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans - painting, firefighting and shiftwork [Internet]. World health organization - International agency for research on cancer; 2007 p. 818. Report No.: 68. Disponible sur: https://publications.iarc.fr/Book-And-Report-Series/Iarc-Monographs-On-The-Identification-Of-Carcinogenic-Hazards-To-Humans/Painting-Firefighting-And-Shiftwork-2010

2. Lee DJ, Koru-Sengul T, Hernandez MN, Caban-Martinez AJ, McClure LA, Mackinnon JA, et al. Cancer risk among career male and female Florida firefighters : evidence from the Florida firefighter cancer registry (1981 - 2014). American journal of industrial medicine. avr 2020;63(4):285-99.

3. Pinkerton L, Bertke S, Yiin J, Dahm M, Kubale T, Hales T, et al. Mortality in a cohort of US firefighters from San Francisco, Chicago and Philadelphia : an update. Occupational and environmental medicine. févr 2020;77(2):84-93.

4. Jalilian H, Ziaei M, Weiderpass E, Rueegg C, Khosravi Y, Kjaerheim K. Cancer incidence and mortality among firefighters. International Journal of Cancer. 2019;145:2639-46.

5. Laroche E, L'Espérance S. Cancer incidence and mortality among firefighters : an overview of epidemiologic systematic reviews. International journal of environmental research and public health. mars 2021;18(5):2519.

6. Brantom PG, Brown I, Baril M, McNamee R. Revue de la littérature épidémiologique sur le risque de cancer chez les pompiers [Internet]. IRSST; 2018 p. 135. Report No.: 1011. Disponible sur: https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-1011.pdf?v=2019-10-12

7. CNRACL. Impact et prévention des risques relatifs aux fumées d'incendie pour les sapeurs-pompiers [Internet]. CNRACL; 2020 p. 12. Disponible sur: https://www.cnracl.retraites.fr/sites/default/files/SERVICES/FNP/Pompiers/Impacts%20et%20prévention%20des%20risques%20relatifs%20aux%20fumées%20dincendie%20pour%20les%20SP%20VF.pdf

8. Guide de doctrine opérationnelle - Prévention des risques liés à la toxicité des fumées [Internet]. Ministère de l'Intérieur - DGSCGC; 2020 p. 31. Disponible sur: http://pnrs.ensosp.fr/Plateformes/Operationnel/Documents-techniques/DOCTRINES-ET-TECHNIQUES-OPERATIONNELLES

9. National Research Council. Risk assessment in the Federal Government : Managing the Process. Washington : National Academy Press [Internet]. 1983; Disponible sur: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25032414/

10. Guillaume E. Effets du feu sur les personnes [Internet]. Laboratoire national de métrologie et d'essais; 2006 p. 163. Disponible sur: https://documents.lne.fr/publications/guides-documents-techniques/rapport-effets-feu-personnes-eric-guillaume.pdf

11. Bisson M, Andres S, Marlière M. Choix de valeurs toxicologiques de référence (VTR) [Internet]. INERIS; 2016 p. 66. Report No.: DRC-16-156196-11306A. Disponible sur: https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/drc-16-156196-11306a-1494926651.pdf

12. Risques sanitaires liés aux expositions professionnelles des sapeurs-pompiers [Internet]. ANSES; 2019 p. 154. Report No.: 2018-SA-0066. Disponible sur:

https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2018SA0066Ra.pdf

13. Thiault G, Rieunier F. Evaluation de l'efficacité de la lance diphasique sur l'émission de polluants gazeux et particulaires. Laboratoire Central de la Préfecture de Police; 2019 p. 7. Report No.: n°19/2484/PR2/RI9.

14. Ministère de l'écologie et du développement durable. Circulaire relative aux sites et sols pollués - bulletin officiel n° 2007/13. 2007.

15. Estimation de l'impact sanitaire d'une pollution environnementale et évaluation quantitative des risques sanitaires [Internet]. InVS / Afsset; 2007 p. 162. Disponible sur: https://www.vie-publique.fr/sites/default/files/rapport/pdf/084000285.pdf

16. Whittaker C, Rice F, McKernan L, Dankovic D, Lentz T, MacMahon K, et al. NIOSH chemical carcinogen policy. Current intelligence bulletin. 2017;(68):28.

17. Les brouillards d'eau dans les tunnels routiers [Internet]. Ministère de l'écologie, de l'énergie et du dévellopement durable - centre d'études des tunnels; 2010 p. 32. Disponible sur: http://www.cetu.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/CETU_DocInfo_brouillard_eau_2010_cle7db48b.pdf

18. 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 p. 186. Report No.: 167/08.

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

Famille	Polluant	Toxicité aigüe	Toxicité chronique (hors cancers)	Effets cancérogènes (classement CIRC)	Source
Composés Organiques Volatils	Benzène Toluène Ethylbenzène Xylènes 1,2,4-triméthylbenzène Styrène Naphtalène Formaldéhyde Acétaldéhyde	Dépression du système nerveux central (fatigue, ébriété, incoordination motrice…)	Troubles psycho-organiques (irritabilité, dépression…)	Benzène : groupe 1	INRS Fiches toxicologiques n° 2, 7, 49, 74, 77, 120, 204, 223, 266
				Formaldéhyde : groupe 1	
		Irritation des voies aériennes supérieures	Pathologie respiratoire chronique, irritation des voies respiratoires	Styrène : groupe 2B	
				Ethylbenzène : groupe 2B	
Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques	Phénanthrène Anthracène Fluoranthène Pyrène Benzo(a)anthracène Chrysène Benzo(b)fluoranthène Benzo(k)fluoranthène Benzo(a)pyrène Dibenzo(a,h)anthracene Benzo(g,h,i)perylene Indéno(1,2,3-c,d)pyrène	Données insuffisantes	Données insuffisantes	Benzo(a)pyrène : groupe 1	INRS Fiche toxicologique n° 32
				Dibenzo(a,h)anthracène : groupe 2A	
				Benzo(a)anthracène Chrysène Benzo(b)fluoranthène Benzo(k)fluoranthène Indéno(1,2,3-c,d)pyrene ⇨ Groupe 2B	
Oxyde carboné	Monoxyde de carbone	Troubles neurologiques (asthénie, céphalées, vertiges…) Convulsions, coma, mort.	Troubles neurologiques. Pathologies cardio-vasculaires.	Données insuffisantes	INRS - Fiche toxicologique n°33
Particules de suies	Fraction inhalable	Irritation des voies respiratoires	Symptômes respiratoires (pneumoconioses). Pathologies cardio-vasculaires	Noir de carbone : groupe 2B Particules en suspension dans l'air (pollution atmosphérique) : groupe 1	INRS – Fiche toxicologique n° 34

Tableau 2 : identification des dangers pour les expositions par inhalation

Polluant	N° CAS	Effets critiques	VTR ($\mu g.m^{-3}$)	Source	Année de révision
Composés organiques volatils					
Benzène	71-43-2	Symptômes neurologiques : céphalées, asthénie, coma, mort.	**30**	ANSES	2008
Toluène	108-88-3	Symptômes neurologiques : céphalées, asthénie, coma, mort.	**21 000**	ANSES	2017
Ethylbenzène	100-41-4	Dépression du système nerveux central (fatigue, …)	**22 000**	ANSES	2016
O-Xylène	95-47-6	Dépression du système nerveux central (fatigue, …)	**8 840**	ATSDR (mélange des 3 isomères)	2007
M,p-Xylènes	108-38-3 106-42-3				
Styrène	100-42-5	Dépression du système nerveux central (fatigue, ...)	**21 500**	ATSDR	2010
Formaldéhyde	50-00-0	Effets irritants et inflammatoires sur les muqueuses nasales	**50**	ATSDR	1999
Acétaldéhyde	75-07-0	Irritation, bronchoconstriction	**3 000**	ANSES	2014
Autres polluants					
Monoxyde de carbone	630-08-0	Effets hypoxiques	**100 000**	AFSSET (valeur guide pour 15 minutes d'exposition (12))	2007

Tableau 3 : sélection des VTR pour les effets aigus à seuil (expositions par inhalation).

Polluant	N° CAS	Effets critiques	VTR ($\mu g.m^{-3}$)	Source	Année de révision
Composés organiques volatils					
Benzène	71-43-2	Diminution du nombre des lymphocytes	**10**	ATSDR	2007
Toluène	108-88-3	Troubles neurologiques (troubles de la vision des couleurs…)	**19 000**	ANSES	2017
Ethylbenzène	100-41-4	Dépression du système nerveux central (fatigue, incoordination motrice…)	**1 500**	ANSES	2016
O-Xylène	95-47-6	Dépression du système nerveux central (fatigue, incoordination motrice…)	**200**	ATSDR (mélange des 3 isomères)	2007
M,p-Xylènes	108-38-3 106-42-3				
1,2,4-triméthylbenzène	95-63-6	Inflammation, lésions pulmonaires	**60**	US EPA	2016
Styrène	100-42-5	Dépression du système nerveux central (fatigue, incoordination motrice…)	**860**	ATSDR	2010
Naphtalène	91-20-3	Lésions de l'épithélium respiratoire et olfactif	**37**	ANSES	2013
Formaldéhyde	50-00-0	Irritations nasales, lésions de l'épithélium nasal	**9**	OEHHA	2008
Acétaldéhyde	75-07-0	Dégénérescence de l'épithélium olfactif	**160**	ANSES	2014
Hydrocarbures aromatiques polycycliques					
Benzo(a)pyrène	50-32-8	Augmentation de la mortalité embryonnaire / fœtale	**0,002**	US EPA	2017
Autres polluants					
Monoxyde de carbone	630-08-0	Effets hypoxiques	**10 000**	AFSSET (valeur guide (12))	2007
Particules - Fraction inhalable	-	Troubles respiratoires	**4 000**	DFG (Fondation Allemande pour la Recherche – valeur guide (13))	2018

Tableau 4 : sélection des VTR pour les effets chroniques à seuil (expositions par inhalation)

Polluant	N° CAS	Effets critiques	VTR ($\mu g.m^{-3})^{-1}$	Source	Année de révision
Composés organiques volatils					
Benzène	71-43-2	Leucémies aigues	**2,60E-05**	ANSES	2013
Ethylbenzène	100-41-4	Carcinome des cellules rénales	**2,50E-06**	OEHHA	2007
Naphtalène	91-20-3	Augmentation de l'incidence des neuroblastes de l'épithélium olfactif	**5,60E-06**	ANSES	2013
Formaldéhyde	50-00-0	Tumeurs nasales	**5,26E-06**	Santé Canada	2000
Acétaldéhyde	75-07-0	Carcinomes des cellules squameuses de la cloison nasale	**2,20E-06**	US EPA	1991
Hydrocarbures aromatiques polycycliques					
			VTR ($\mu g.m^{-3})^{-1}$	FET	
Phénanthrène	85-01-8	Incidence des tumeurs du tractus respiratoire supérieur (cavités nasales, larynx et trachée)	**6,00E-04**	0,001	US EPA (procédure utilisant les facteurs équivalents toxiques (FET), recommandée par l'INERIS (14)) 2017
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					
Particules - Fraction inhalable	-	Mortalité toute cause (sauf accidentelle)	**1,27E-07**	AFSSET (VTR appliquée aux PM 10 (15))	2007

Tableau 5 : sélection des VTR pour les effets chroniques sans seuil (expositions par inhalation).

Polluant	N° CAS	Concentration lance traditionnelle (µg.m^{-3})		Concentration brumisation (µg.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**	**140**	**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**	**0,625**	**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**	**1,204**	**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 6 : concentrations en polluants mesurées dans le cadre de la campagne de mesures.

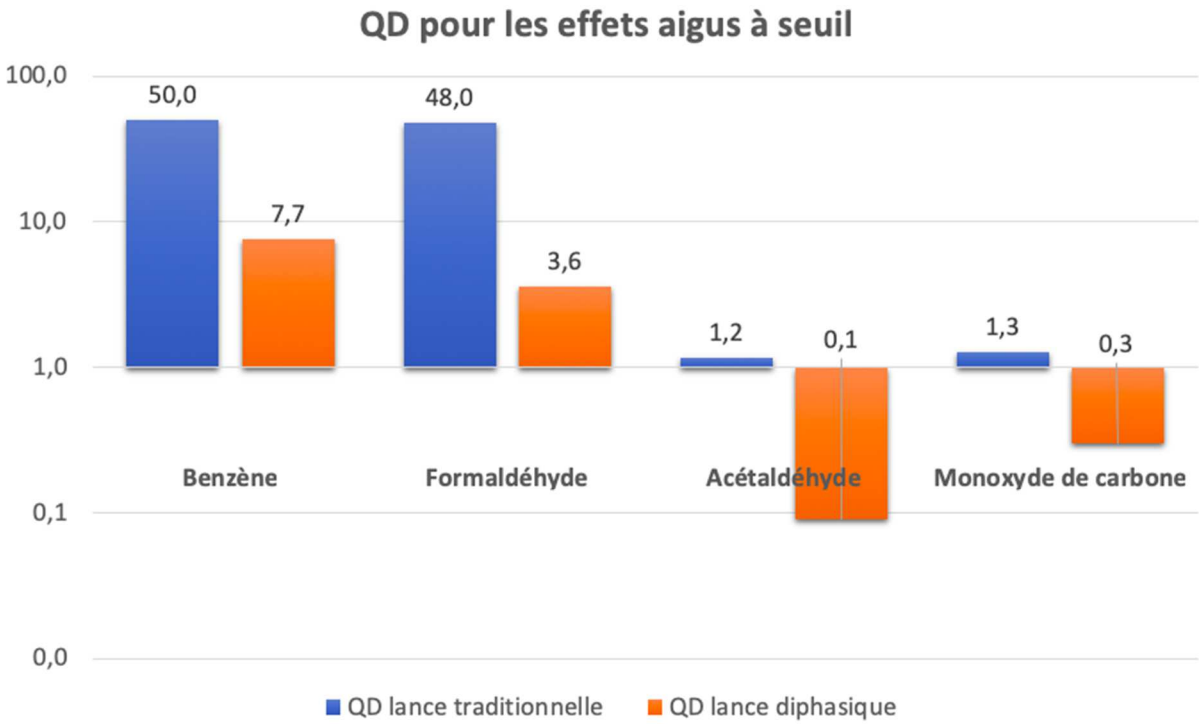


Figure 1 : caractérisation des risques associés à l'exposition aigue aux différents polluants présents dans les fumées d'incendie (effets aigus avec seuil). Comparaison des quotients de danger avec lance traditionnelle (en bleu) et brumisation (en orange).

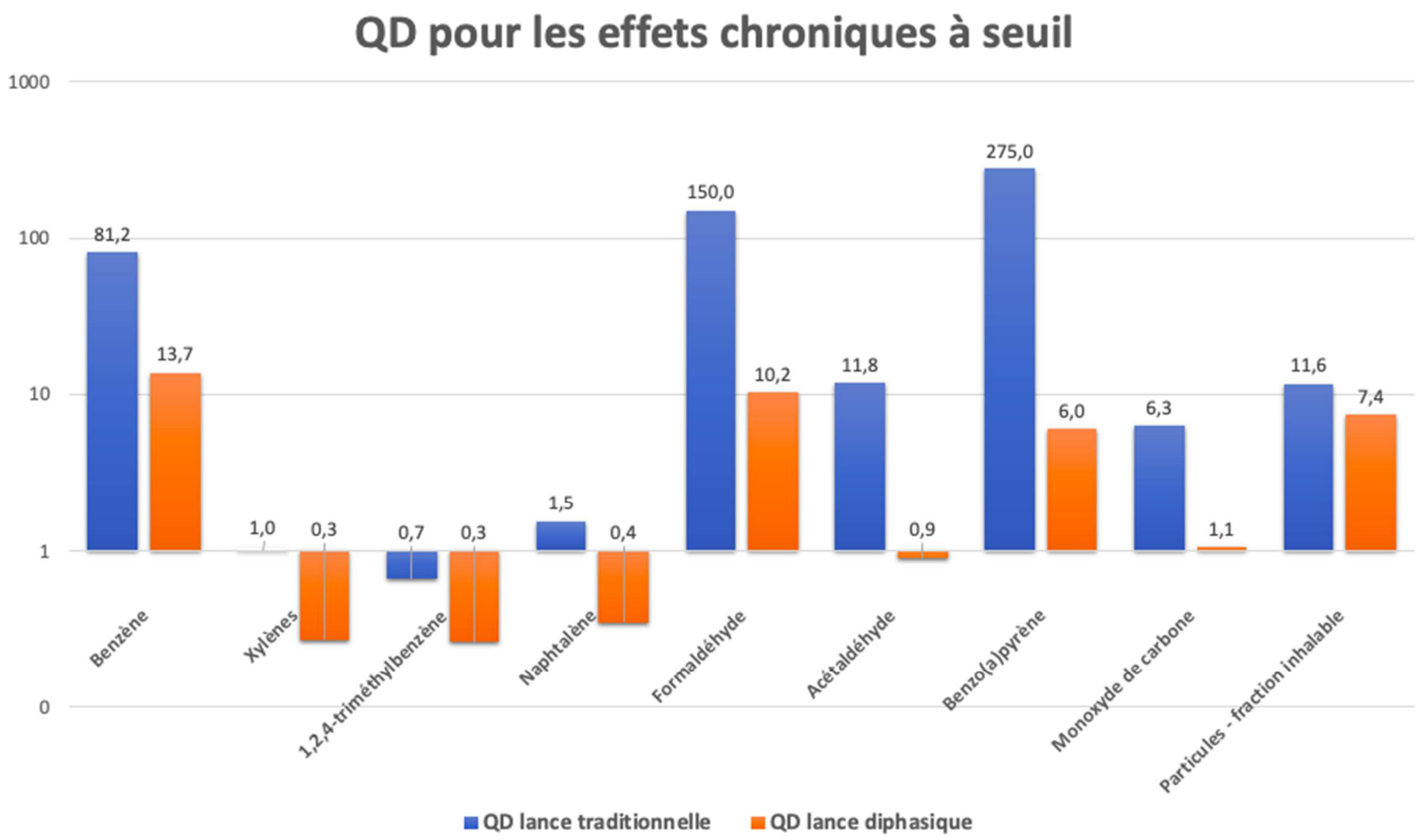


Figure 2 : caractérisation des risques associés à l'exposition chronique aux différents polluants présents dans les fumées d'incendie (effets chroniques avec seuil). Comparaison des quotients de danger avec lance traditionnelle (en bleu) et brumisation (en orange).

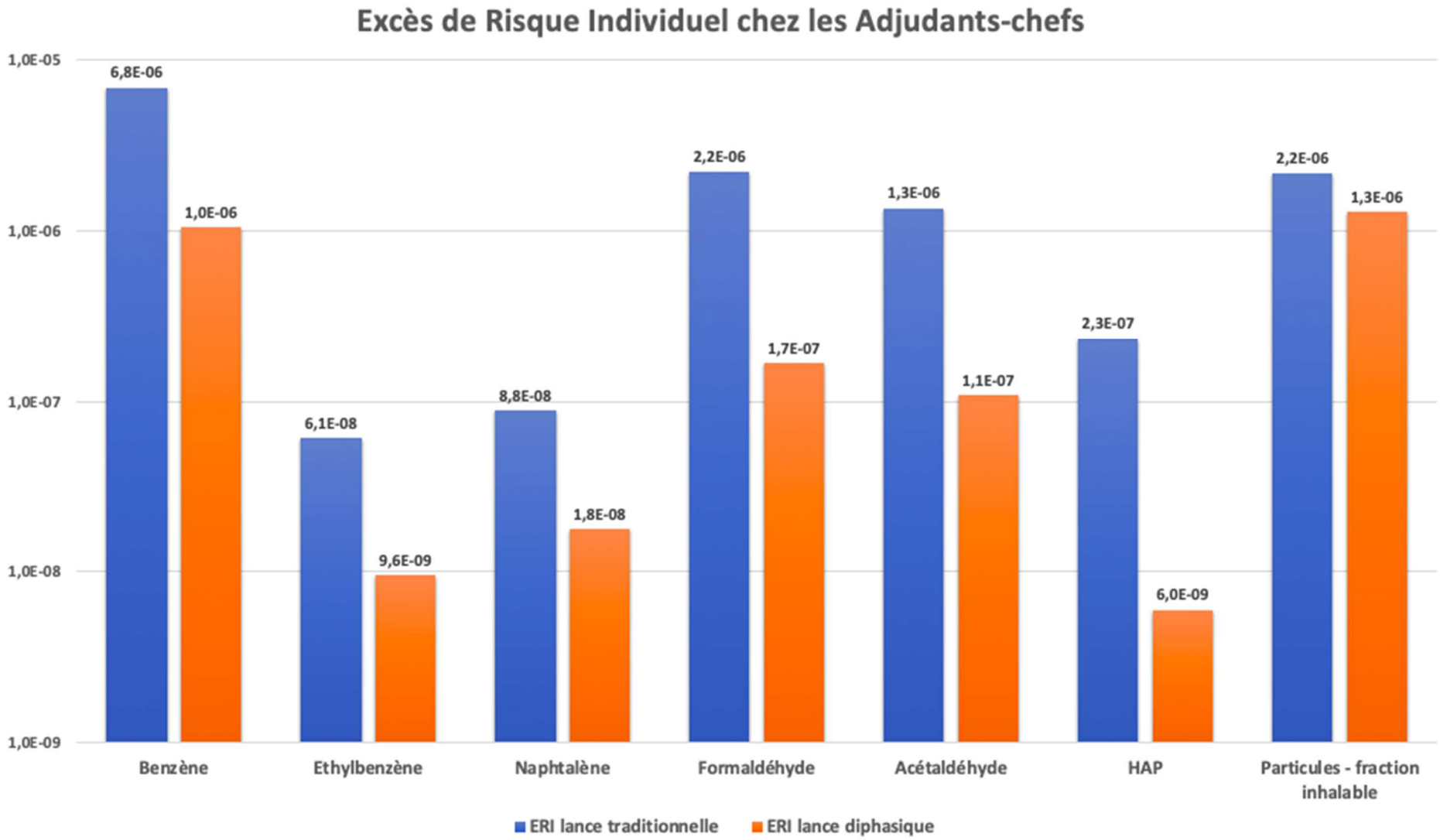


Figure 3 : caractérisation des risques de cancers associés à l'exposition aux différents polluants présents dans les fumées d'incendie chez les adjudants-chefs. Comparaison des ERI avec lance traditionnelle (en bleu) et brumisation (en orange).

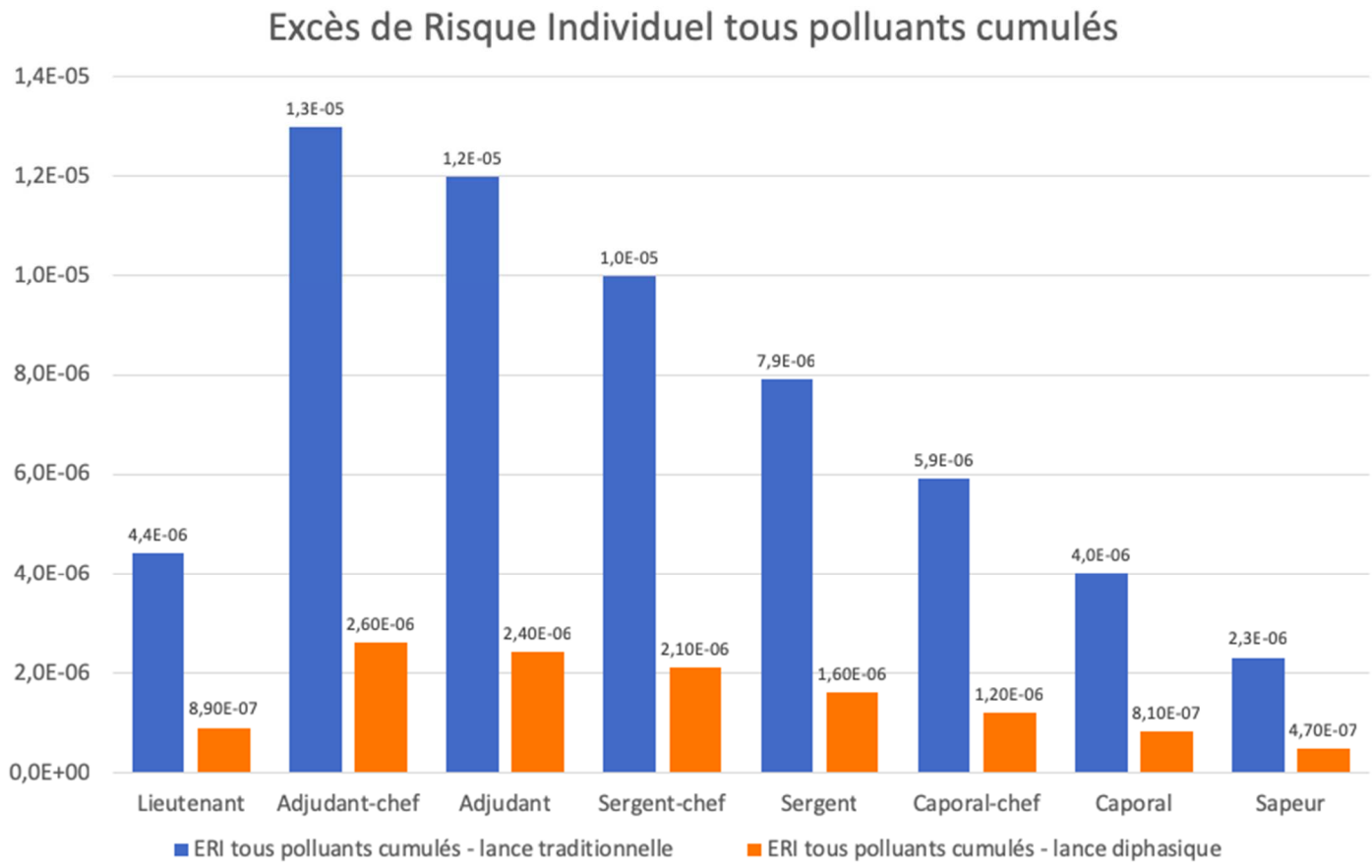


Figure 4 : excès de risque individuels de cancer (tous polluants cumulés) par grade associés à l'exposition aux fumées d'incendie, en fonction du type d'extinction : avec une lance traditionnelle (en bleu) ou avec la brumisation (en orange).