

Substances chimiques et agents biologiques

Études et recherches

RAPPORT R-571



**Risques pour la santé des pompiers
forestiers et protection respiratoire**

Claire Austin



Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

NOS RECHERCHES

Mission *travaillent pour vous !*

Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes.

Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.

Assurer la diffusion des connaissances, jouer un rôle de référence scientifique et d'expert.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission de la santé et de la sécurité du travail.

Pour en savoir plus

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour.

De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement. www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine Prévention au travail, publié conjointement par l'Institut et la CSST.
Abonnement : 1-877-221-7046

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales
2008

ISBN : 978-2-89631-294-8 (version imprimée)

ISBN : 978-2-89631-295-5 (PDF)

ISSN : 0820-8395

IRSST - Direction des communications
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
Télécopieur : 514 288-7636
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail,
septembre 2008



Substances chimiques et agents biologiques

Études et recherches

■ RAPPORT R-571

Risques pour la santé des pompiers forestiers et protection respiratoire

Avis de non-responsabilité

L'IRSST ne donne aucune garantie relative à l'exactitude, la fiabilité ou le caractère exhaustif de l'information contenue dans ce document. En aucun cas l'IRSST ne saurait être tenu responsable pour tout dommage corporel, moral ou matériel résultant de l'utilisation de cette information.

Notez que les contenus des documents sont protégés par les législations canadiennes applicables en matière de propriété intellectuelle.

*Claire Austin, PhD, CMC, CIH,
Consultante*

Cliquez recherche
www.irsst.qc.ca



Cette publication est disponible
en version PDF
sur le site Web de l'IRSST.

CONFORMÉMENT AUX POLITIQUES DE L'IRSS

Les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document
ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

REMERCIEMENTS

Durant la préparation de ce rapport, j'ai eu de nombreuses et précieuses discussions avec des personnes qui ont élargi de différentes façons ma compréhension de la lutte contre les feux de forêt et de la protection respiratoire. J'aimerais tout particulièrement remercier Serge Poulin (Centre interservices des feux de forêt du Canada (CIBFC)), Leah Parlour (Fire and Emergency Services Authority (FESA) d'Australie-Occidentale), Dave Haston, Brian Sharkey et Roger Ottmar (Service des forêts des États-Unis), Timothy Reinhardt (Geo Matrix), Jim Johnson (Laboratoire national Lawrence Livermore des États-Unis, retraité), Jeff Burgess (École de santé publique de l'Université de l'Arizona), ainsi que Denise Gaughan et Roland Berry Ann (NIOSH).

Je tiens aussi à remercier la Société de protection des forêts contre le feu (SOPFEU) et les membres du groupe de travail patronal-syndical sur la protection respiratoire (Daniel Chayer, Sylvain Tremblay, René Ferland, Jacques St-Onge, Vincent Demers, Stéphane Drouin et Jacques Thiboutot de la SOPFEU, et Gervais St-Pierre de l'Association de la santé et de la sécurité des industries de la forêt du Québec (ASSIFQ)) pour leur participation aux réunions d'information relatives à ce projet. Ce sont leur souci de la santé des pompiers forestiers et leur intérêt pour les questions relatives à la protection respiratoire qui ont suscité ce projet et qui l'ont porté à l'attention de l'IRSSST. Je voudrais en outre remercier Jacques Thiboutot et Stéphane Drouin de m'avoir donné l'occasion d'aller sur les lieux du feu de Chibougamau de 2005 pour observer le travail des pompiers durant l'extinction de l'incendie, de même que les membres de l'équipe qui m'a accueillie sur place pour mon séjour de deux jours. Mes remerciements, également, aux personnes qui ont pris part à la conférence téléphonique au cours de laquelle les recommandations finales ont été discutées : Stéphane Drouin, Laurent Gagnon et Jacques Thiboutot (poste 00); Daniel Chayer, Serge Imbeault, André Landry et Claude Tremblay (poste 01); Philippe Poirier, Jacques St-Onge, Guillaume Tremblay et Sylvain Tremblay (poste 02); Marc Clément et Ghislain Rozon (poste 03); Luc Dugas et Robert Villeneuve (base 04).

Parallèlement à ce projet, j'ai participé à un certain nombre d'activités connexes, mais non subventionnées, qui ont grandement influé sur le contenu et les recommandations du présent rapport. Je suis notamment reconnaissante d'avoir pu assister à un symposium sur la lutte contre les feux de forêt organisé par le NIOSH en mars 2005. Je dois des remerciements particuliers aux membres du Conseil des normes de la National Fire Protection Association (NFPA) qui, en mars 2007, a favorablement examiné les communications de différentes personnes appuyant l'élaboration d'une nouvelle norme respiratoire en ce qui concerne la lutte contre les feux de forêt, ainsi que les membres du Comité technique sur le matériel de protection respiratoire de la NFPA et du Comité technique d'intégration qui ont appuyé l'élaboration d'une telle norme. Le Congrès international des pompiers forestiers de 2007 coïncidait avec la rédaction finale de ce rapport, et les organisateurs de l'événement m'ont très gentiment permis de présenter une affiche sur le thème de la protection respiratoire à l'intention des pompiers forestiers. Ils m'ont également permis d'annoncer un événement parallèle dans le programme du congrès afin de donner aux participants la possibilité de discuter de ce sujet important dans le cadre d'une réunion subsidiaire. Finalement, je remercie les pairs anonymes qui ont revu ce document pour leurs suggestions, ainsi que les membres du Groupe de travail sur la protection respiratoire des pompiers forestiers de la NFPA, et les membres du groupe de travail sur la protection respiratoire de la SOPFEU et de l'ASSIFQ qui ont eux-mêmes revu le rapport préliminaire et

fourni de précieux commentaires. Bien que la présentation finale de ce rapport ait été retardée par ma participation aux activités de la NFPA et de l'IWFC, de même que par ma volonté d'attendre que la NFPA annonce ses plans concernant l'élaboration d'une nouvelle norme de protection respiratoire relative à la lutte contre les feux de forêt, j'estime que le résultat final n'en est que meilleur et que les intérêts des pompiers forestiers du Québec s'en trouvent mieux servis.

Les aspects visuels de ce rapport ont été grandement rehaussés par des photographies gracieusement fournies par la SOPFEU, MSA, 3M et le Service des forêts des États-Unis. Merci à tous.

En dernier lieu, je remercie l'IRSST de m'avoir donné l'occasion de travailler à ce projet, de même que pour son soutien financier. Je remercie tout particulièrement Nicole Goyer, avec qui j'ai toujours eu grand plaisir à travailler au fil des ans, pour son inestimable soutien et son orientation professionnelle tout au long de ce projet.

RÉSUMÉ

Les pompiers forestiers sont exposés à un mélange complexe de produits de combustion, inclusion faite du monoxyde de carbone, de vapeurs et de gaz irritants, d'agents cancérogènes, de particules inhalables et de nanoparticules. Ils fournissent un niveau d'effort considérable lorsqu'ils combattent des incendies, et leurs quarts de travail peuvent s'étendre jusqu'à 16 heures ou plus.

Des études sur les pompiers forestiers ont été réalisées aux États-Unis et en Australie, mais jamais au Québec. Ces pompiers font souvent état de troubles respiratoires et neurologiques. Une déperdition de la fonction respiratoire a aussi été observée au gré des quarts et des saisons. Comme il est difficile d'acheminer du matériel d'échantillonnage à la lisière d'un incendie naissant, la plupart des études ont porté sur la collecte d'échantillons individuels lorsque l'intensité de la fumée était « faible » ou « faible à moyenne ». Bien qu'on ait interprété certaines de ces études comme révélant que les niveaux d'exposition, échelonnés sur la semaine de travail d'un pompier ou sur l'ensemble de sa carrière, sont en-deçà des limites d'exposition professionnelles moyennes pondérées sur 8 heures, d'autres ont démontré que l'exposition à certains produits de combustion toxiques dépasse de loin les limites d'exposition professionnelle de courte durée au moins une partie du temps. Des pics d'exposition au monoxyde de carbone atteignant 1 200 ppm ont été observés au moment de lutter contre des feux de forêt. On a constaté que les pics d'exposition aux produits de combustion dépassaient de 3 à 10 fois les limites d'exposition de courte durée dans environ 50 % des cas.

Les substances les plus préoccupantes sont le monoxyde de carbone, le formaldéhyde, l'acroléine et les particules inhalables. Un deuxième groupe préoccupant, quoiqu'à des concentrations proportionnellement plus faibles, comprend le benzène, le dioxyde de carbone (CO₂), les oxydes d'azote, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), l'ammoniac et le 2-furaldéhyde. Un troisième groupe préoccupant, quoiqu'à des concentrations proportionnellement plus faibles aussi, comprend l'acétaldéhyde, le 1,3-butadiène, le méthane, le méthanol, le styrène, l'acétonitrile, le propionaldéhyde, le toluène, le bromométhane, le méthyléthylcétone, l'acétone, le chlorométhane, le xylène, le phénol, le tétrahydrofurane, l'iodométhane et le mercure. Les données suggèrent que si les pompiers forestiers sont exposés à 25 ppm de monoxyde de carbone (soit une valeur inférieure à la limite d'exposition admissible), il se peut qu'ils soient surexposés au formaldéhyde, aux HAP (benzo[a]pyrène) et aux particules inhalables.

Aux États-Unis, la National Fire Protection Association a récemment annoncé qu'elle allait de l'avant avec l'élaboration d'une nouvelle norme de protection respiratoire dans la lutte contre les feux de forêt, mais il faudra un certain temps avant que des respirateurs homologués soient mis à la disposition des pompiers forestiers.

Si les contrôles administratifs ne suffisent pas à réduire les risques d'exposition à des niveaux acceptables, il importe de fournir aux pompiers forestiers des respirateurs à même de filtrer le formaldéhyde, les particules inhalables, les vapeurs et les acides organiques, l'acroléine et les HAP. Les pompiers forestiers doivent cependant être informés qu'à des niveaux de travail intenses, l'efficacité et la durée de vie des cartouches purifiantes restent inconnues. On craint par ailleurs que les pompiers qui utilisent un appareil respiratoire filtrant s'exposent sans le savoir à des niveaux plus élevés de contaminants non filtrés par leur respirateur qu'ils ne le feraient autrement. Jusqu'à ce qu'un respirateur conçu pour la lutte contre les feux de forêt filtre

efficacement le monoxyde de carbone, les appareils disponibles devraient être utilisés de concert avec un détecteur d'oxyde de carbone.

TABLE DES MATIÈRES

1.	OBJECTIFS	1
2.	MÉTHODOLOGIE.....	3
2.1	Recherche documentaire.....	3
2.2	Ressources humaines, conditions de travail et accidents.....	3
2.3	Observations sur le terrain	3
2.4	Composants de la fumée	3
2.5	Taux de risque.....	3
2.6	Données d'exposition.....	3
3.	GESTION DES FEUX DE FORÊT	5
3.1	Organismes de gestion	5
3.2	Objectifs opérationnels au Québec	5
3.3	Ressources humaines	6
4.	CONDITIONS DE TRAVAIL	7
4.1	Transport, hébergement et quarts de travail.....	7
4.2	Niveaux de travail physiologique	9
4.3	Stress thermique.....	9
5.	TOXICITÉ DES COMPOSANTS DE LA FUMÉE ET LIMITES D'EXPOSITION	13
5.2	Toxicité de la fumée.....	13
5.2.1	Effets aigus.....	13
5.2.2	Immunotoxicité.....	14
5.2.3	Cancérogénicité.....	14
5.2.4	Modèles toxicologiques	15
5.3	LIMITES D'EXPOSITION PROFESSIONNELLE	16
5.3.1	Lignes directrices vs limites imposées par la loi	16
5.3.2	Divers types de limites d'exposition professionnelle	16
5.3.3	Unités de mesure de l'exposition professionnelle	17
5.3.4	Ajustement des limites d'exposition professionnelle	18
5.4	COMPOSANTS CHOISIS DE LA FUMÉE.....	18
5.4.1	Matières particulaires.....	18
5.4.1	Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	22
5.4.2	Formaldéhyde	22
5.4.3	Monoxyde de carbone (CO).....	22
5.4.4	Acroléine.....	24
6.	ÉPIDÉMIOLOGIE ET SURVEILLANCE MÉDICALE.....	25
6.1	Épidémiologie.....	25
6.2	Surveillance médicale	28
6.3	Évaluation médicale périodique.....	31
7.	ÉVALUATION DE L'EXPOSITION À LA FUMÉE	33
7.1	Évaluation visuelle de la fumée	34
7.1.1	Niveaux de fumée faible, moyen et élevé.....	34
7.1.2	Facteurs parasites dans l'estimation visuelle de la fumée.	39
7.2	Mesure de la fumée.....	40
7.2.1	Facteurs d'émission	40

7.2.2	Taux de risque normalisés	41
7.3	Mesures d'exposition individuelles	45
7.3.1	Exposition moyenne pondérée en fonction de la durée du quart de travail	45
7.3.2	Les pics d'exposition à la fumée.....	50
7.4	Le monoxyde de carbone en tant que substitut de l'exposition à la fumée	54
8.	PROTECTION RESPIRATOIRE	57
8.1	Pratiques actuelles.....	57
8.2	Normes actuelles.....	59
8.3	Options disponibles.....	59
9.	CONCLUSIONS.....	63
10.	RECOMMANDATIONS EN MATIÈRE DE PROTECTION RESPIRATOIRE.....	65
11.	FUTURES RECHERCHES.....	67

TABLEAUX

Tableau 1.	Limites d'exposition professionnelle de substances choisies présentes dans la fumée.....	20
Tableau 2.	La carboxyhémoglobine (COHb) et signes et symptômes connexes.....	23
Tableau 3.	Facteurs d'émission des feux de forêt et taux de risque normalisés.....	42
Tableau 4.	Comparaison des taux de risque fondée sur les TLV de l'ACGIH et les VEA du Québec	44
Tableau 5.	Niveaux d'exposition moyens pondérés en fonction de la durée moyenne du quart de travail des pompiers (NIOSH)	46
Tableau 6.	Niveaux d'exposition moyens pondérés en fonction de la durée moyenne du quart de travail des pompiers (Service des forêts des É.-U.)	48
Tableau 7.	Expositions de 30 minutes à des brûlages dirigés.....	64

FIGURES

Figure 1.	Camp de base temporaire dans un pavillon de chasse lors de l'incendie de Chibougamau de 2005	7
Figure 2.	Un incendie d'envergure dans le nord du Québec (Chibougamau, 2005).....	8
Figure 3.	Pompiers forestiers utilisant des outils manuels aux É.-U.....	10
Figure 4.	Matériel transporté par les pompiers forestiers du Service des forêts des É.-U.	11
Figure 5.	Pompier forestier du Québec utilisant un boyau d'incendie.....	11
Figure 6.	Nombre total de crises cardiaques et de décès liés au travail chez les pompiers forestiers.....	26
Figure 7.	Crises cardiaques liées au travail pour différentes catégories de pompiers forestiers.....	27
Figure 8.	Extinction d'un gros incendie de forêt (changements rapides de niveaux d'exposition)	35
Figure 9.	Extinction d'un gros incendie de forêt (diverses impressions d'intensité de fumée)	35
Figure 10.	Situations d'exposition à la fumée vécues par les pompiers forestiers du Québec ..	36
Figure 11.	Extinction d'un gros incendie de forêt (exposition « moyenne » à la fumée)	37
Figure 12.	Maintien d'une ligne de feu à un brûlage donné (exposition « élevée » à la fumée)	37
Figure 13.	Maintien d'une ligne de feu à un brûlage donné (exposition « très élevée » à la fumée)	37
Figure 14.	Estimation visuelle de l'intensité de la fumée	38
Figure 15.	Niveaux de fumée difficiles à soutenir lors du maintien d'une ligne de feu	39
Figure 16.	Super-brouillard.....	40
Figure 17.	Distribution des masses de particules de fumée	47
Figure 18.	Exposition intermittente des pompiers forestiers au monoxyde de carbone	51
Figure 19.	Exposition des pompiers forestiers aux matières particulaires (MP _{2,5}) et au monoxyde de carbone	53
Figure 20.	Pompier forestier utilisant un brûleur par gravité pour dresser un contre-feu.....	54
Figure 21.	Lien entre le monoxyde de carbone et les niveaux d'autres composants de la fumée	56
Figure 22.	Images au microscope électronique à balayage (MEB) d'un nouveau mouchoir de tête non lavé.....	63

ÉQUATIONS

Équation 1.	Formule de conversion (mg/m^3 en ppm).....	18
Équation 2.	Formule de conversion (ppm en mg/m^3).....	18
Équation 3.	Formule de mixage additif.....	49

1. OBJECTIFS

Ce rapport fait suite à une demande d'information reçue par l'IRSST de l'Association de santé et sécurité des industries de la forêt du Québec (ASSIFQ) et de la Société de protection des forêts contre le feu (SOPFEU) concernant les besoins de protection respiratoire des pompiers forestiers. L'IRSST est un organisme non gouvernemental dont le conseil de direction est composé à parts égales de représentants patronaux et syndicaux. La présente étude visait deux objectifs : a) résumer la documentation pertinente concernant l'exposition à des substances pouvant être toxiques dans la fumée des feux de forêt et les risques sanitaires qui en découlent pour les pompiers, et b) formuler une recommandation indépendante, fondée sur la santé, concernant les besoins en matière de protection respiratoire.

2. MÉTHODOLOGIE

2.1 Recherche documentaire

Des recherches d'articles pertinents ont été effectuées dans Medline et Current Contents au moyen des mots clés *((fire*) and (wildland)) or (bushfire*) or (firefight*) or ((emission*) and (fire*))* jusqu'en septembre 2007. Des rapports pertinents ont été recherchés auprès du Service des forêts du département de l'Agriculture des États-Unis. Les listes de références des publications relevées ont été examinées afin de trouver d'autres études pertinentes.

2.2 Ressources humaines, conditions de travail et accidents

On a demandé de l'information et de la documentation pertinentes au Comité de santé et sécurité patronal-syndical de la SOPFEU. La SOPFEU a par ailleurs fourni des données sur les accidents en milieu de travail et sur les demandes d'indemnités des travailleurs. L'auteure n'a cependant pas eu directement accès à ces données et n'a pu les contrôler. Les données relatives à d'autres compétences géographiques ont été extraites de la documentation.

2.3 Observations sur le terrain

L'auteure a observé les activités des pompiers forestiers pendant deux jours consécutifs durant l'extinction de l'important incendie de Chibougamau de 2005, au Québec (Canada). Aucun prélèvement d'échantillons ni analyse de fonctions n'a toutefois été réalisé, car ils ne faisaient pas partie du mandat de cette étude.

2.4 Composants de la fumée

Les composants de la fumée à l'emplacement des feux de forêt ont été dérivés d'études d'exposition des pompiers forestiers et d'études d'émissions de forêts extratropicales.

2.5 Taux de risque

Les facteurs d'émission ont été pris dans la documentation. Les taux de risque ont été calculés pour chaque composant de la fumée en divisant son facteur d'émission par la valeur d'exposition moyenne pondérée (VEMP) en fonction d'un quart de 8 heures. Dans le cas du formaldéhyde et de l'acroléine, les valeurs plafonds ont remplacé les VEMP, et la VEMP du dioxyde d'azote a été utilisée dans le cas des oxydes d'azote. Étant donné que les résultats ne sont pas fondés sur des mesures d'exposition réelle, les taux de risques ont été normalisés en fonction des résultats obtenus pour le monoxyde de carbone.

2.6 Données d'exposition

Les pics d'exposition et les niveaux d'exposition pondérés en fonction de la durée du quart moyen proviennent de la littérature sur les pompiers forestiers.

3. GESTION DES FEUX DE FORÊT

3.1 Organismes de gestion

Au Québec, la SOPFEU est responsable de la prévention, de la détection et de l'extinction des incendies de forêt dans la province. L'Institut de protection contre les incendies du Québec (IPIQ) et l'École de formation des pompiers (EFP) se limitent à former les pompiers municipaux, dont les conditions de travail, l'équipement, le temps d'exposition, les stratégies et les tactiques sont très différents de ceux des pompiers forestiers. Au Québec, comme dans le reste du Canada et aux États-Unis, la formation des pompiers forestiers se fait en grande partie sur le terrain.

Au Canada, le Centre interservices des feux de forêt du Canada (CIFFC) fournit des services opérationnels de contrôle d'incendie, de même que des services de gestion et d'information à ses organismes membres de compétence provinciale. Le CIFFC coordonne les services offerts à l'ensemble des provinces et territoires ainsi que le partage de ressources avec les États-Unis et d'autres pays.

Aux États-Unis, le National Wildfire Coordinating Group (NWCG) regroupe le Service des forêts du département de l'Agriculture (USDA), la Federal Emergency Management Agency (FEMA), l'U.S. Fire Administration, quatre organismes de l'intérieur – le Bureau of Land Management (BLM), le National Park Service (NPS), le Bureau of Indian Affairs (BIA) et le Fish and Wildlife Service (FWS) –, l'Intertribal Timber Council et des organismes forestiers d'État membres de la National Association of State Foresters. Le NWCG fournit un cadre d'entente officiel quant aux normes de formation, à l'équipement, aux qualifications requises et à diverses fonctions opérationnelles.

3.2 Objectifs opérationnels au Québec

Le Québec se divise en deux zones distinctes dont l'une bénéficie d'une protection intensive contre les incendies de forêt, et l'autre d'une protection restreinte. La zone de protection intensive (Zone 1) couvre 130 millions d'acres (52 665 832 ha) et englobe toutes les régions depuis les Cantons de l'Est (en bordure des États-Unis) jusqu'à Matagami, Chibougamau et Manic-5, au nord du fleuve Saint-Laurent. On compte dans cette zone cinq principaux postes de protection contre les incendies de forêt, situés à Val d'Or, Maniwaki, Roberval et Baie-Comeau. La Zone 2, qui s'étend au nord de la première, ne bénéficie que d'une protection restreinte contre les incendies de forêt, qu'on laisse d'ailleurs généralement s'éteindre d'eux-mêmes, sans intervention humaine. La saison des incendies de forêt débute normalement en avril, avec une cinquantaine de foyers à travers la province. Entre mai et août, le nombre d'incendies augmente généralement à 200 par mois, pour ensuite décroître aux environs de 50 par mois en septembre et en octobre. En moyenne, 810 incendies de forêt ravagent chaque année 0,2 million d'acres (81 000 ha) dans la Zone 1 en dépit des efforts de protection intensifs dont elle bénéficie (SOPFEU, 2003) Les grands arbres abattus ne se consomment pas au passage du front de feu. Ils se consomment plutôt durant la phase de combustion couvante, ou « continue ».

Les objectifs opérationnels de la SOPFEU pour tous les feux de forêt de la Zone 1 sont les suivants : « découvrir tout incendie avant qu'il n'ait franchi 1,2 acre (0,5 ha); intervenir en force dans l'heure suivant la découverte de l'incendie; maîtriser l'incendie sur tout son périmètre avant 10 h le lendemain; contenir et éteindre l'incendie avant qu'il n'atteigne 7,4 acres (3 ha). »

En 2003, ces objectifs ont été atteints dans 88 % à 89 % des cas. La suppression des 11 % à 12 % restants des incendies de forêt dans la Zone 1 peut durer des semaines, pendant lesquelles les pompiers forestiers sont continuellement exposés à la fumée à un degré ou à un autre.

3.3 Ressources humaines

Au Québec, les employés saisonniers qui luttent contre les feux de forêt sont couverts par six conventions collectives différentes (SOPFEU, 2003). En 2005, environ 450 pompiers forestiers étaient susceptibles d'être exposés à la fumée. D'entre eux, 193 pompiers forestiers permanents (186 hommes et 7 femmes) avaient en moyenne 17 ans d'expérience, et étaient en moyenne âgés de 42 ans. Les pompiers forestiers permanents du Québec sont aussi appelés à combattre des incendies dans d'autres provinces lorsqu'un plan d'entraide est mis en place. En 2003, par exemple, 113 pompiers forestiers du Québec ont été envoyés dans d'autres provinces, plus particulièrement en Colombie-Britannique.

Aux États-Unis, quelque 80 000 pompiers forestiers combattent environ 70 000 incendies de forêt ravageant autour de 2 millions d'acres (0,81 millions ha) (Service des forêts de l'USDA 1989). Par ailleurs, plus de 5 000 pompiers municipaux combattent au-dessus de 2 000 incendies de forêt détruisant 0,5 million d'acres (0,2 million ha) de terrains en friche et de milieu périurbain.

Le profil des pompiers forestiers étasuniens est assez différent de celui de leurs homologues québécois. Les travailleurs saisonniers comptaient pour 95 % des participants à une étude du parc national de Yosemite, en Californie (Reh *et al.*, 1994). L'âge moyen des participants était de 28 ans ($n=21$, $SD=8$); 71 % d'entre eux étaient de sexe masculin et 29 % de sexe féminin; 48 % étaient caucasiens, 38 % amérindiens et 14 % hispaniques. En ce qui concerne le tabagisme chez les participants de l'étude du parc national de Yosemite, 76 % n'avaient jamais fumé, 10 % étaient d'anciens fumeurs et 14 % étaient fumeurs; 10 % des participants ont déclaré souffrir d'asthme, et 10 % d'allergies. Les participants avaient en moyenne travaillé pendant 5 saisons d'incendies ($n=21$, $SD=5$). La durée de carrière des pompiers de Type II a été estimée à 7 ans (Reh *et al.*, 1994; Booze *et al.*, 2004), tandis que celle des pompiers de Type I a été estimée à 8 ans, en moyenne, pour un maximum de 25 ans (Aldrich, 1995).

4. CONDITIONS DE TRAVAIL

4.1 Transport, hébergement et quarts de travail

Au Québec, les pompiers forestiers jouissent de bien meilleures conditions de travail que dans les autres provinces canadiennes ou qu'aux États-Unis. Au contraire de leurs homologues de l'Ouest canadien ou du sud de la frontière, ils sont quotidiennement transportés par voie de terre ou par hélicoptère sur les lieux de l'incendie depuis un motel ou un pavillon de chasse situé dans une zone relativement dépourvue de fumée (Figure 1 et Figure 2). En 2005, ils ont passé un total de 145 689 heures à combattre des feux, à raison de 755 heures en moyenne par pompier (Drouin 2006).

Aux États-Unis, les pompiers forestiers peuvent travailler jusqu'à 24 heures d'affilée et souffrir d'un manque de sommeil, du mal de l'altitude, d'une alimentation déficiente, du stress thermique et de l'exposition à la fumée (Ruby *et al.*, 2002). Les quarts de 12 à 24 heures pendant 6 jours consécutifs, suivis d'une journée de repos, ne sont pas rares. Les pompiers forestiers peuvent combattre un même feu pendant deux semaines ou plus. Il leur faut soit chaque jour marcher d'un camp de base temporaire, soit dormir près de la ligne de feu si la distance à parcourir est trop importante ou s'il y a moins de fumée qu'au camp de base. Pour les années 1990-1994, on estime qu'en moyenne, les équipes Hot Shot de Type I couvrant deux districts de l'État de Washington passaient 64 jours par année à combattre des incendies de forêts, à raison de 5 jours par brûlage, ces valeurs passant respectivement à 97 jours et à 17 jours dans le 95^e percentile (Booze *et al.*, 2004).



Courtoisie de C. Austin

Figure 1. Camp de base temporaire dans un pavillon de chasse lors de l'incendie de Chibougamau de 2005 (illustré à la Figure 2).



Courtoisie de C. Austin

Figure 2. Un incendie d'envergure dans le nord du Québec (Chibougamau, 2005).

Outre les incendies de forêt, il existe deux types de brûlages dirigés : a) les feux de sol de faible intensité, sous le couvert forestier qui protège les arbres, et b) les brûlages extensifs, ou complet, qui peuvent être de forte intensité. Pour les années 1990-1994, on estime qu'en moyenne, les équipes de Type II couvrant deux districts de l'État de Washington passaient 10 jours par année à combattre des incendies, à raison de 3 jours par brûlage, ces valeurs passant respectivement à 46 jours et à 22 jours dans le 95^e percentile (Booze *et al.*, 2004). Une étude faisait état d'équipes travaillant à 6 100 pi (1 859 m) d'altitude à raison de 9 heures sur la ligne de feu (Reh *et al.*, 1994). Les niveaux de fumée sont généralement plus élevés dans les brûlages dirigés que dans les incendies de forêt, bien que les concentrations de combustibles y soient généralement moindres. Dans le cas des brûlages dirigés, les pompiers doivent circonscrire le feu dans des limites prédéfinies, ce qui les amène à travailler plus près du feu et donc à être davantage exposés à la fumée que dans un incendie de forêt. Dans le cas des incendies de forêt, si le feu se dissémine au-delà de la ligne de feu, les pompiers s'éloignent normalement de l'incendie pour établir une nouvelle ligne de feu plutôt que de chercher à l'éteindre tout en maintenant la ligne de feu compromise.

4.2 Niveaux de travail physiologique

Compte tenu des différences de tactiques et de méthodes de travail, on ne sait pas si la dépense d'énergie totale des pompiers forestiers du Québec est comparable ou non à celle de leurs homologues étasuniens. Des observations sur le terrain suggèrent toutefois qu'au Québec, le métier de pompier forestier est physiquement exigeant, et s'exerce dans des conditions défavorables sur la ligne de feu et durant les activités d'extinction.

L'observation des pompiers suggère qu'ils déploient de grands efforts physiques lorsqu'ils combattent des incendies de forêt (Reh *et al.*, 1994). L'Environmental Protection Agency (EPA) des États-Unis estime que le volume d'air inhalé par les travailleurs en plein air qui font un travail pénible est de 20 m³/jour (EPA, 1997; EPA, 2001). Des taux de renouvellement d'air de 2,4 m³/h et de 3,6 m³/h ont respectivement été utilisés pour le calcul des niveaux d'exposition moyen et raisonnablement maximale (ERM) (Booze *et al.*, 2004). La dépense d'énergie totale maximale chez l'humain est d'environ 29 à 27 MJ/jour (Westerterp *et al.*, 1986). Des activités comme la marche en forêt, l'établissement d'une ligne de feu, le travail à la tronçonneuse et le retrait des broussailles exige environ 7,5 kcal/min (Budd *et al.*, 1997; Ruby *et al.*, 2002). La dépense d'énergie totale (DET) des membres d'équipes d'élite engagés dans des activités de suppression sur une période de cinq jours était d'environ 20 MJ/jour chez les hommes, par rapport, à 21 MJ/jour chez les militaires en manœuvres de simulation de combat (Hoyt *et al.*, 1991; Ruby *et al.*, 2002). L'activité physique (EEA) exige environ de 4 à 12 MJ/jour des membres d'équipes d'élite, et varie selon les affectations, l'intensité que chacun met à son travail et l'emplacement des feux (Ruby *et al.*, 2002; Ruby *et al.*, 2003a; Ruby *et al.*, 2003b; Eglin, 2008). Aux États-Unis, les pompiers forestiers utilisent beaucoup d'outils manuels et transportent beaucoup de matériel avec eux (Figure 3). Les tactiques utilisées au Québec diffèrent grandement de celles en usage aux États-Unis et dans l'Ouest canadien. La Figure 4 montre le matériel type transporté par les pompiers forestiers du Service des forêts des États-Unis. Au Québec, les pompiers forestiers utilisent beaucoup moins d'outils manuels; à titre d'exemple, ils ont davantage recours à l'eau pour la suppression, et transportent moins d'équipement (Figure 5). Et puisqu'on les transporte par voie de terre ou par hélicoptère, les pompiers forestiers du Québec ont aussi beaucoup moins de distance à marcher pour se rendre au feu.

4.3 Stress thermique

Les pompiers forestiers sont couramment exposés à des températures variant entre 25 et 60°C, et à des flux de chaleur rayonnante variant entre 1 et 8 kW/m² (ISO, 2006). Dans le cas des pompiers forestiers, le stress thermique est davantage dû à l'épuisement physique (environ 500 W) qu'au feu lui-même (environ 200 W) (Budd *et al.*, 1996). En règle générale, les pompiers forestiers perdent 1 à 2 litres d'eau par heure sous forme de transpiration.

Dans certaines situations périlleuses de courte durée, les pompiers forestiers peuvent être exposés à des températures variant entre 60 et 300°C, et à des flux de chaleur rayonnante variant entre 8 et 20 kW/m². La respiration par le nez devient difficile à 125°C, et la respiration par la bouche devient difficile à 150°C, tandis que des lésions irréversibles à une peau sèche surviennent en 30 sec à 180°C (ISO, 2006).

On ne saurait s'attendre à ce que des pompiers échappent à un feu envahissant ou à une situation d'encerclement sans blessures virtuellement mortelles. En pareilles situations

d'urgence, ou d'activité extrême du feu, ils pourraient être exposés à des températures variant entre 300 et 1 200°C, et à des flux de chaleur rayonnante variant entre 20 et 100 kW/m².



Courtoisie du Service des forêts des É.-U.

Figure 3. Pompiers forestiers utilisant des outils manuels aux É.-U. (Service des forêts du département de l'Agriculture des É.-U., 1999).



Courtoisie du Service des forêts des É.-U.

Figure 4. Matériel transporté par les pompiers forestiers du Service des forêts des États-Unis. La photo A montre le matériel normalement transporté lors de l'attaque initiale. La poche verticale arrière est un réservoir d'hydratation (« bosse de chameau »). La grande poche arrière contient une tente-abri. La poche gauche contient des accessoires de manutention d'eau de base (lance d'arrosage, adaptateurs de filetage, etc.). À droite (non visible) se trouve un étrangleur. S'il est affecté à un camion-citerne, le pompier porte aussi près de 15 kg de boyau. La photo B montre le sac d'effets personnels supplémentaire (eau, Gatorade, casse-croûte, vêtements de rechange, etc.) à transporter sur la ligne de feu durant les affectations prolongées (p. ex., équipes de soutien).



Courtoisie de la SOPFEU

Figure 5. Pompier forestier du Québec utilisant un boyau d'incendie. L'eau, abondante au Québec, est pompée d'une rivière ou d'un lac voisin.

5. TOXICITÉ DES COMPOSANTS DE LA FUMÉE ET LIMITES D'EXPOSITION

5.1 Composition de la fumée

La composition de la fumée produite par des feux de différentes natures est étonnamment semblable (Austin, 1997; Austin, 2001b; Austin *et al.*, 2001b; Austin *et al.*, 2001c; Austin et Wang, 2002). La fumée des feux de forêt se compose d'un mélange de gaz, de composés organiques et de particules, notamment de dioxyde de carbone (CO₂), de monoxyde de carbone (CO), d'oxydes d'azote (NO_x), de dioxyde de soufre (SO₂), de benzène, d'aldéhydes (p. ex., formaldéhyde, acétaldéhyde), de radicaux libres et de matières particulaires inhalables (MPI). Les principales catégories de composés organiques résultant de la combustion d'une biomasse sont des séries homologues de n-alcanes, de n-alcènes, d'acides alcanoniques et de n-alcanols; de méthoxyphénoliques provenant de la lignine, de dérivés de monosaccharide provenant de la cellulose, de biomarqueurs stéroïdes et terpénoïdes, et des HAP (Simoneit, 2002; Naeher *et al.*, 2007).

Les principaux HAP trouvés dans le totum et certains fragments séparés de fumée provenant de brindilles, d'aiguilles et de cônes de conifères, par exemple, comprennent le phénanthrène, le fluoranthène et le pyrène, avec un faible apport d'anthracène, de C₁- et C₂-phénanthrènes/anthracènes, de benzo[a]pyrène, de benz[a]anthracène, de m-chrysène, de cyclopenta[c,d]pyrène (XXI) et de benzo[ghi]pérylène (Simoneit 2002). Les matières particulaires recueillies depuis un avion traversant une « épaisse » fumée au-dessus d'un brûlage dirigé étaient de moins de 1,0 µm, la majorité d'entre elles étant de 0,1 µm (Vines, 1976). Cependant, les agglomérats avaient un diamètre de 50 µm. Il a été constaté qu'un panache de fumée « épaisse » au-dessus d'un brûlage dirigé contenait entre 10⁵ et 10⁶ particules/cm³ (Vines, 1976). La composition moyenne des matières particulaires s'établissait comme suit : goudron (55 %), carbone (25 %) et cendres (20 %) (Vines, 1976). Une étude du Service des forêts des États-Unis portant sur l'échantillonnage de panaches de fumée émanant de feux de forêt a conclu à une distribution comparable du nombre et de la taille des particules, la concentration numérique augmentant proportionnellement à la décroissance du diamètre aérodynamique (Radke *et al.*, 1990).

5.2 Toxicité de la fumée

5.2.1 Effets aigus

La fumée des feux de forêt est toxique, bien qu'elle puisse être moins toxique que la fumée des feux municipaux (Naeher *et al.*, 2007). Des études épidémiologiques de différentes populations ont révélé un lien entre l'exposition à des particules ambiantes et une augmentation des symptômes respiratoires (y compris une déperdition de la fonction pulmonaire), des admissions à l'hôpital, des visites à l'urgence et de la mortalité. Quelques études communautaires ont échoué à démontrer une augmentation des cas d'asthme traités dans les services d'urgence d'hôpitaux en lien avec des feux de forêt (Cooper *et al.*, 1994; Smith *et al.*, 1996). Cependant, d'autres études ont conclu à un tel lien (Duclos *et al.*, 1990; Emmanuel, 2000; Johnson *et al.*, 2002; Chen *et al.*, 2006). Reisen et Brown ont quant à eux débattu des répercussions de l'exposition à la fumée des feux de forêt sur la santé des collectivités (Reisen et Brown, 2006).

Les pompiers forestiers sont exposés à un grand nombre de substances dont le taux de risque individuel est faible par rapport au monoxyde de carbone (voir sections 6.2.1 et 6.2.2), mais dont les effets irritants sont additifs : acétaldéhyde, acétone, gaz acides, acroléine, ammoniac, formaldéhyde, 2-furaldéhyde, bromométhane, méthyléthylcétone (MEK), iodométhane, oxydes d'azote, propionaldéhyde, particules inhalables, styrènes, tétrahydrofurane et xylènes. Les matières particulaires présentes dans la fumée ont sans doute aussi des propriétés irritantes du fait des gaz et des vapeurs adsorbés. Les composants suivants de la fumée ont des effets sur le système nerveux central qui peuvent aussi être additifs : monoxyde de carbone, oxydes d'azote, méthane, méthanol, toluène, méthyléthylcétone (MEK), chlorométhane, phénol, tétrahydrofurane, iodométhane, mercure et éthylbenzène. Les effets synergiques possibles d'une exposition à un mélange de substances toxiques présentes dans la fumée des feux de forêt est inconnue. Une récente étude du NIOSH sur des particules de fumée variant de 0,042 à 24 µm sur les lieux de feux de forêt lors des activités d'extinction et de brûlage à contrevent a démontré que les particules ultrafines (0,042 à 0,24 µm) étaient celles qui produisaient le plus de dommages en termes de formes réactives de l'oxygène (FRO) (Leonard *et al.*, 2007). Les particules fines et ultrafines (0,42 à 2,4 µm) induisaient toutes deux une peroxydation lipidique, et les particules de toutes tailles produisaient des radicaux hydroxydes ($\cdot\text{OH}$) en présence de H_2O_2 , et endommageaient de même l'ADN en présence de H_2O_2 .

5.2.2 Immunotoxicité

Les précurseurs radicaux en phase gazeuse présents dans la fumée de bois ont une durée de vie suffisamment longue pour se déposer profondément dans les poumons, où ils se décomposent en radicaux libres à même de provoquer le cancer (Pryor, 1992). Il a été démontré que l'exposition à la fumée de bois entraîne une augmentation du sérum-amyloïde A et des facteurs plasmatiques chez les humains, de même qu'une modification des indicateurs généraux de toxicité chez les rongeurs : augmentation du nombre de plaquettes dans le sang, du nombre de globules blancs en circulation et du poids de la rate, et diminution de l'azote uréique du sang, du sérum-alanine, de la transaminase et du poids du foie (Barregard *et al.*, 2006; Reed *et al.*, 2006). Les aldéhydes et les acides réduisent l'activité ciliaire, et par le fait même la capacité des voies respiratoires à expulser les particules et les micro-organismes (Dost, 1991). Il a été démontré qu'une immunotoxicité résulte de l'exposition à de faibles doses de fumée de bois (Fick *et al.*, 1984; Thomas et Zelikoff, 1999; Zelikoff *et al.*, 2002a; Zelikoff *et al.*, 2002b; Reed *et al.*, 2006). Cela pourrait expliquer, du moins en partie, une observation du NWCG et du Service des forêts des États-Unis selon laquelle entre 30 et 50 % des visites aux postes de premiers soins sur le terrain étaient motivées par des problèmes des voies respiratoires supérieures (rhume, toux, mal de gorge) (NWCG, 1997). On ne sait toutefois pas dans quelle mesure d'autres facteurs peuvent amoindrir les fonctions immunitaires.

5.2.3 Cancérogénicité

Les effets nocifs de la fumée de biomasse en combustion n'ont pas beaucoup été étudiés. Néanmoins, le CIRC a réuni suffisamment de preuves scientifiques pour classer les combustibles à base de biomasse comme étant « probablement cancérigènes pour l'humain » (groupe 2A) (Straif *et al.*, 2006; CIRC, sous presse). Cette évaluation était fondée sur des preuves restreintes de la cancérogénicité des émissions provenant de la combustion d'une biomasse (surtout du bois) pour les humains et les animaux de laboratoire, sur des preuves suffisantes de la cancérogénicité

d'extraits de fumée de bois pour les animaux de laboratoires, et sur de solides preuves de mutagénicité (Straif *et al.*, 2006; CIRC, sous presse).

Les pompiers sont exposés à un mélange complexe de produits de combustion incluant de nombreux agents cancérigènes. Cependant, les schémas d'exposition à des niveaux de fumée de composition variable et élevés par intermittence sont difficiles à quantifier dans les études sur le cancer chez les pompiers. Cela limite les capacités des études de conception traditionnelle, comme celles qui ont jusqu'ici été menées, à cerner adéquatement les taux de cancer chez les pompiers. C'est ainsi qu'en tenant compte des « preuves restreintes de cancérigénicité pour les humains », le CIRC a classé la lutte contre les incendies comme possiblement cancérigène pour l'humain (groupe 2B) (Straif *et al.*, 2007; CIRC *et al.*, sous presse).

Les propriétés cancérigènes du goudron contenu dans la fumée recueillie au-dessus de brûlages dirigés semblaient beaucoup moindres que celles du goudron minéral et du benzopyrène utilisés comme agents de contrôle, mais ces tests se sont avérés non concluants (Vines, 1976). Par contre, un certain nombre d'agents cancérigènes connus pour les humains se trouvent dans la fumée des feux de forêt (p. ex., benzène, benzo[a]pyrène, 1,3-butadiène, formaldéhyde et suie) (NTP, 2005; CRIC, 2006). On peut raisonnablement s'attendre à ce que beaucoup d'autres substances présentes dans la fumée des feux de forêt soient cancérigènes (p. ex., acétaldéhyde, éthylbenzène, furane, isoprène et naphthalène) (CIRC, 2000; NTP, 2005). D'autres ont été prouvées cancérigènes pour les animaux sans pertinence connue pour les humains (p. ex., tétrahydrofurane) (ACGIH, 2007b).

5.2.4 Modèles toxicologiques

Beaucoup des travaux sur la toxicité de la fumée ont mis l'accent sur les aspects éventuellement mortels d'expositions brèves mais aiguës à de hauts niveaux de gaz toxiques entraînant une neutralisation qui empêche toute fuite ou qui provoque la mort suivant une fuite. D'énormes efforts ont été consacrés à l'élaboration de modèles à même de prédire cette neutralisation à partir des effets combinés d'un mélange de gaz toxiques dégagés par les feux (Speitel, 1995; Levin, 1996; Levin, 1997; Purser, 2002; ISO, 2005; Stuhmiller *et al.*, 2006). Les modèles actuels représentent les gaz habituels (CO, HCN, NO₂, SO₂, HCl, HF, HBr, CO₂, acroléine, faible O₂) et la chaleur dégagée par les feux. Cependant, tous les modèles existants ignorent complètement les aérosols, de même que de nombreux autres composés toxiques présents dans la fumée. Les modèles d'étude actuels de la toxicité de la fumée ignorent également nombre d'autres paramètres importants (Stuhmiller *et al.*, 2006) : l'effet des interactions internes sur les mécanismes de contrôle de la respiration, les effets sur des populations prédisposées ou très fortement susceptibles, les interactions de gaz irritants dans les voies respiratoires supérieures pouvant influencer sur l'absorption, la distinction entre de faibles concentrations de gaz irritants causant des dommages à long terme et de fortes concentrations causant des dommages immédiats. De plus, le taux de renouvellement d'air est très différent d'une espèce à l'autre, ce qui rend difficile l'extrapolation des résultats de tests aux humains. Finalement, les modèles actuels ignorent les interactions toxiques ou les effets synergiques internes biochimiques et physiologiques que nous savons exister. Entre autres l'interaction du CO₂ avec un faible taux de O₂ (Duffin *et al.*, 2000), ou la compétition pour l'hémoglobine entre O₂, CO et NO₂ (Weibel, 1984). Il existe vraisemblablement beaucoup d'autres interactions toxiques inconnues. Plus important encore, ces modèles ne prédisent ni les effets aigus ni les effets chroniques sur la santé d'une exposition professionnelle à la fumée.

5.3 Limites d'exposition professionnelle

5.3.1 Lignes directrices vs limites imposées par la loi

Ce rapport traite aussi bien des recommandations fondées sur la santé que des limites d'exposition professionnelle imposées par la loi. Les lignes directrices relatives aux limites d'exposition professionnelle sont publiées par le National Institute of Occupational Safety and Health (IDLH) et l'American Conference of Government Industrial Hygienists (TLV, BEI, STEL et valeurs plafonds). Le National Institute of Occupational Safety and Health (NIOSH) est une division de Centers for Disease Control and Prevention (CDC) du département américain de la Santé et des Services sociaux. L'American Conference of Government Industrial Hygienists (ACGIH) est un organisme non gouvernemental privé et sans but lucratif. Les limites d'exposition professionnelle de l'ACGIH, qui sont publiées annuellement, reposent sur un examen des publications scientifiques de comités d'experts en santé publique et en sciences connexes revues par des pairs, notamment en hygiène industrielle, en toxicologie, en médecine du travail et en épidémiologie. L'ACGIH ne cherche pas, comme dans le cas des normes consensuelles, à fixer des limites acceptables pour tous les intervenants. Et contrairement aux organismes gouvernementaux, elle ne fonde les critères de conformité ni sur des facteurs de faisabilité économique ou technique, ni sur l'existence ou non de méthodes acceptables. Les limites d'exposition de l'ACGIH se veulent l'expression d'une opinion scientifique et sont conçues pour servir de lignes directrices ou de recommandations aux hygiénistes du travail appelés à évaluer et à contrôler d'éventuels risques pour la santé en milieu de travail. Elles ne représentent qu'un facteur à considérer parmi une foule d'autres dans l'évaluation de situations et de conditions de travail particulières (ACGIH, 2007b). Aux États-Unis, les limites imposées par la loi sont appelées « limites d'exposition admissibles », ou *permissible exposure limits* (PEL), et elles sont publiées par l'Occupational Safety and Health Administration (OSHA). Au Québec, les limites imposées par la loi sont appelées « valeurs d'exposition admissibles » (VEA), et elles sont publiées en français et en anglais dans le *Règlement sur la santé et la sécurité au travail* (Province de Québec, 2007).

5.3.2 Divers types de limites d'exposition professionnelle

DIVS (IDLH). Les niveaux présentant un danger immédiat pour la vie ou la santé (*Immediately Dangerous to Life and Health*) sont fondés sur les risques de mort ou d'effets nocifs permanents immédiats ou à retardement pouvant résulter d'une exposition de 30 minutes. Cette définition ne signifie PAS que les travailleurs peuvent être exposés à de tels niveaux pendant 30 minutes ! (NIOSH, 2004a).

Limites d'excursion. Peuvent s'appliquer aux substances pour lesquelles il n'existe ni VECD ni valeur plafond. À condition que la VEMP soit respectée, des excursions peuvent dépasser 3 fois cette valeur pour une période cumulée d'au plus 30 minutes par jour de travail. Toutefois, aucune de ces excursions ne doit dépasser 5 fois la VEMP pour quelque durée que ce soit (ACGIH, 2007b).

VEA. Valeurs d'exposition admissibles établies par le gouvernement du Québec. Dans la province de Québec, il incombe à la Commission de santé et sécurité au travail (CSST) de les faire respecter en vertu de la loi. Les VEMP correspondent aux valeurs d'exposition admissibles moyennes pondérées sur 8 heures comparables aux TLV_{TWA} de l'ACGIH. Les VECD

correspondent aux valeurs d'exposition de courte durée moyennes pondérées sur 15 minutes comparables aux $STEL_{TWA}$ de l'ACGIH.

VECD (STEL). Les valeurs d'exposition de courte durée (*Short Term Exposure Limits*) correspondent aux expositions moyennes pondérées sur 15 minutes qui ne doivent être dépassées à aucun moment de la journée, même si la moyenne pondérée dans le temps pour l'ensemble du quart est inférieure à la VEMP (TLV_{TWA}) publiée (ACGIH, 2007b). Les VECD correspondent aux niveaux auxquels on estime que les travailleurs peuvent être exposés sans subir d'irritations, de dommages chroniques ou irréversibles aux tissus, d'effets toxiques dépendants du débit de dose ou de narcose dont le degré risque d'accroître les probabilités de blessure accidentelle, d'incapacité à se sauver soi-même ou de réduction importante de l'efficacité au travail (ACGIH, 2007b). Les expositions aux VECD ne doivent pas survenir plus de 4 fois par jour, et deux expositions successives de cet ordre doivent être séparées par un intervalle d'au moins 60 minutes (ACGIH, 2007b).

VEMP. Moyennes pondérées dans le temps pour une journée de travail conventionnelle de 8 heures et une semaine de travail de 40 heures.

VLE (PEL). Valeurs limites d'exposition (*Permissible Exposure Limits*) établies par l'Occupational Safety and Health Administration (OSHA) des États-Unis. Elles font l'objet d'une obligation exécutoire en vertu de la loi aux États-Unis.

VLE (TLV). Une valeur limite d'exposition (*Threshold Limit Value*) correspond à la concentration à laquelle on estime que pratiquement tous les travailleurs sont exposés à répétition, jour après jour, au cours d'une vie de travail, sans effets néfastes sur la santé (ACGIH, 2007b). Les VLE doivent être utilisées en conjonction avec l'édition la plus récente de la documentation (ACGIH, 2007a). Les VLE sont établies en termes de moyennes pondérées sur 8 heures (VEMP), de limites d'exposition de courte durée pondérées sur 15 minutes (VLECD) et de valeurs plafonds (VLE_p). Les VLE sont des limites d'exposition recommandées.

VLE_p (TLV_c). Les valeurs plafonds correspondent aux concentrations de substances qui ne doivent être dépassées à aucun moment de la journée, même brièvement (ACGIH, 2007b).

5.3.3 Unités de mesure de l'exposition professionnelle

Les aérosols comprennent les suspensions de gouttelettes de liquide et de matières particulaires. La concentration des aérosols dans l'air est exprimée en mg/m^3 . La concentration des gaz et des vapeurs peut être exprimée en mg/m^3 ou en parties par million (ppm). Pour convertir des mg/m^3 en ppm à TPN (25°C et 760 Torr), utilisez l'Équation 1 (ACGIH, 2007b) :

Équation 1. Formule de conversion (mg/m³ en ppm)

$$ppm = \frac{\frac{mg}{m^3} \times 24,45}{PM}$$

PM = poids moléculaire (masse molaire) du gaz ou de la vapeur

Pour convertir des ppm en mg/m³ à TPN (25°C et 760 torr), utilisez l'Équation 2 :

Équation 2. Formule de conversion (ppm en mg/m³)

$$\frac{mg}{m^3} = \frac{ppm \times PM}{24,45}$$

5.3.4 Ajustement des limites d'exposition professionnelle

Les limites d'exposition professionnelle ont été établies pour des horaires de travail de 5 jours/semaine à raison de 8 heures/jour. En conséquence, il peut être nécessaire d'ajuster certaines des limites d'exposition mentionnées dans ce rapport dans le cas des pompiers forestiers dont les quarts de travail sont plus longs. Pour ce faire, l'IRSST utilise la méthode de Haber. Pour plus de détails, vous pouvez consulter le rapport technique T-22 de l'IRSST (Brodeur *et al.*, 2001; ACGIH, 2007b; Drolet, 2008). Les limites d'exposition professionnelle peuvent aussi devoir être ajustées à la baisse pour tenir compte des niveaux d'effort élevés que déploient les pompiers forestiers. De tels ajustements débordent du cadre du présent rapport.

5.4 Composants choisis de la fumée

Les seuils de perception olfactive de composants choisis de la fumée et les valeurs limites d'exposition (VLE/TLV) de l'American Conference of Government Industrial Hygienists (ACGIH), les indices biologiques d'exposition (IBE/BEI), les valeurs d'exposition de courte durée (VECD/STEL) et les niveaux d'exposition présentant un danger immédiat pour la vie ou la santé (DIVS/IDLH) sont fournis dans le Tableau 1. Des limites d'exposition professionnelle n'existent pas pour tous les composants nocifs de la fumée (p. ex., radicaux libres).

5.4.1 Matières particulaires

Il n'y a pas de limites d'exposition professionnelle spécifiquement applicables aux particules de fumée. On estime toutefois que même les matières particulaires (MP) à faible toxicité peuvent avoir des effets néfastes sur la santé (ACGIH, 2007b). Les matières particulaires de la fumée renferment une proportion importante de particules respirables (diamètre aérodynamique médian ≤ 4 µm), y compris des particules ultrafines et des nanoparticules. Il y a plus de deux décennies,

Morrow *et al.* ont justifié une restriction de l'exposition aux matières particulaires respirables non classées ailleurs (MPNCA) en fonction d'une concentration moyenne pondérée sur 8 heures de 1 mg/m^3 (Morrow *et al.*, 1991). L'on ignore quelle limite d'exposition assurerait une protection contre des particules ultrafines de macrophage alvéolaire s'échappant de la paroi interalvéolaire ou migrant vers des organes extrapulmonaires comme le foie ou le cerveau (Morrow, 1992; Oberdörster, 2004). À ce stade, l'ACGIH recommande que les expositions à des matières particulaires respirables non classées ailleurs soient maintenues en-deçà de 3 mg/m^3 (ACGIH, 2007b). Le point de découpage médian de $4 \mu\text{m}$ correspond à $\text{MP}_{3,5}$ dans les publications plus anciennes. L'exposition aux particules de fumée respirables ne devrait certes pas dépasser 3 mg/m^3 puisqu'elles peuvent assurer le transport de gaz et de vapeurs toxiques adsorbés vers la zone d'échange gazeux des poumons. Dans le cas de matières particulaires inhalables (c.-à-d. de particules ayant un diamètre aérodynamique médian de $100 \mu\text{m}$) non classées ailleurs, l'ACGIH recommande que les expositions soient maintenues en-deçà de 10 mg/m^3 (ACGIH, 2007b). Les organismes de réglementation environnementaux ont traditionnellement focalisé sur les particules respirables ayant un diamètre aérodynamique de $2,5 \mu\text{m}$ ($\text{MP}_{2,5}$) et sur les matières particulaires thoraciques ayant un diamètre aérodynamique de $10 \mu\text{m}$ (MP_{10}). Il n'y a pas de limites d'exposition en fonction du nombre de particules. Au Québec, il n'y a de valeurs d'exposition admissibles ni pour les particules respirables ni pour les matières particulaires thoraciques. La valeur d'exposition admissible au Québec pour l'ensemble des matières particulaires non classées ailleurs (les particules inhalables) est de 10 mg/m^3 .

Tableau 1. Limites d'exposition professionnelle de substances choisies présentes dans la fumée

Composé	Unités	VLE ^a			DIVS ^e	Seuil olfactif	BEI ^f					Fondement de la limite d'exposition	Remarques
		VEMP ^b	VECD ^c	PLAFOND ^d									
Acroléine (Québec) ^g	ppm	- (0,1)	- (0,3)	0,1 (-)	2	0,16 ^h	-	-	-	-	-	Irritation des yeux et des voies respiratoires supérieures. Œdème pulmonaire. Emphysème pulmonaire.	Irritant pour la peau. Brûle et se volatilise facilement. Irritation intense à 5,5 ppm (Henderson et Haggard 1943). En peu de temps, 10 ppm ou plus est léthal.
Benzène (Québec)	ppm	0,5 (1)	2,5 (5)	- (-)	500	34-119 ⁱ	Fin de quart	Urine	Acide S-phénylmercapturique	25	µg/g créatinine	Cancer (leucémie). Cancérogène confirmé pour les humains.	Absorption par la peau.
							Fin de quart	Urine	Acide t,t-muconique	500	µg/g créatinine		
Monoxyde de carbone (Québec)	ppm	25 (35)	(200)	200 ^j (-)	1200	inodore ^j	Fin de quart	Sang	Carboxy-hémoglobine (COHb)	3,5	%COHb	Empêcher les changements neurologiques nuisibles et maintenir la capacité d'exercice cardiovasculaire chez les travailleurs au repos ou légèrement actifs.	-
							Fin de quart	Souffle exhalé	Monoxyde de carbone (CO)	20	ppm		
Formaldéhyde (Québec)	ppm	- (-)	- (-)	0,3 (2)	20	0,5-1,0 ^k	-	-	-	-	Irritation des yeux et des voies respiratoires supérieures.	Agent sensibilisateur (allergène). Cancérogène soupçonné pour les humains. Provoque chez la plupart des humains une irritation des yeux, du nez et de la gorge à 1-3 ppm; beaucoup de sujets ne peuvent tolérer une exposition prolongée à 4-5 ppm.	
Benzo[a]-pyrène (Québec)	mg/m ³	- (0,005)	- (-)	- (-)	-						Cancer		

^aValeur limite d'exposition (TLV) de l'American Conference of Industrial Hygienists (ACGIH). ^bMoyenne pondérée sur 8 heures. ^cLimite d'exposition moyenne de courte durée pondérée sur 15 minutes. ^dValeur plafond. Concentration d'une substance qui ne devrait être dépassée à aucune phase d'une exposition professionnelle. ^ePrésentant un danger immédiat pour la vie ou la santé.

Limite d'exposition recommandée par le National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) pour faire en sorte qu'un travailleur puisse échapper à une situation d'exposition susceptible de causer la mort, de produire des effets nocifs permanents immédiats ou à retardement ou d'empêcher toute fuite du milieu. ^fIndice d'exposition biologique de l'ACGIH. Les niveaux de déterminants les plus susceptibles d'être observés dans des spécimens prélevés auprès de travailleurs en santé ayant été aussi exposés à des substances chimiques que des travailleurs exposés à l'inhalation de VLE. Voir aussi le *Guide de surveillance biologique* du Québec (IRSST, 2004). ^gLimite d'exposition légale au Québec (Province de Québec, 2007). ^h(Amoore et Hautala, 1983; ATSDR, 2000). ⁱ(AIHA, 1989; ATSDR, 2007). ^j(NIOSH, 2005b). ^k(ATSDR, 1999; Costa, 2001).

5.4.1 Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

Un des composés aromatiques polycycliques les plus étudiés est le benzo[a]pyrène, un composé organique semi-volatile (COSV) et un agent cancérigène connu pour les humains. On en trouve dans les volatiles du brai, dans les émissions de cokerie, dans l'échappement des diesels, dans la fumée de cigarette et dans les aliments grillés sur charbon de bois. La PEL de l'OSHA est de 0,2 mg/m³ pour les volatiles du brai et de 0,15 mg/m³ pour les émissions de cokerie, mais il n'y a pas de PEL spécifique au benzo[a]pyrène. L'ACGIH n'a pas défini de TLV pour le benzo[a]pyrène, mais compte tenu de sa cancérigénicité, elle recommande de réduire à des niveaux aussi bas que possible les expositions par toutes les voies. Au Québec, la valeur d'exposition admissible (VEA) pour les volatiles du brai est de 0,2 mg/m³, et la valeur plafond pour le benzo[a]pyrène est de 0,005 mg/m³ (province de Québec, 2007).

5.4.2 Formaldéhyde

On a rapporté qu'une exposition à 10 à 20 ppm produit presque aussitôt une irritation des yeux et une vive sensation de brûlure dans le nez et la gorge qui peuvent s'accompagner de toux, d'éternuements et d'une difficulté à respirer profondément (Eastman Kodak Company, 1963). On a estimé qu'une exposition de 5 à 10 minutes à 50 à 100 ppm peut causer de graves lésions dans les voies respiratoires inférieures (Eastman Kodak Company, 1963). La plupart des humains ressentent une irritation des yeux, du nez et de la gorge à 1 à 3 ppm, et beaucoup ne peuvent tolérer une exposition prolongée à 4 à 5 ppm, tandis que des difficultés respiratoires surviennent à 10 à 20 ppm (CRIC, 1982). Une irritation des voies respiratoires supérieures et une résistance accrue des voies nasales ont été rapportées à 0,1 à 25 ppm, et une obstruction des voies respiratoires inférieures et des poumons a été rapportée à 5 à 30 ppm (CNRC, 1981). On a estimé qu'une exposition de 5 à 10 minutes à 50 à 100 ppm peut causer de graves lésions dans les voies respiratoires inférieures des humains (Eastman Kodak Company, 1963). Outre ses effets irritants, le formaldéhyde est un agent cancérigène connu pour les humains. Suffisamment d'études ont démontré qu'une exposition professionnelle engendre un cancer nasopharyngien, et beaucoup d'autres ont révélé qu'une exposition professionnelle engendre la leucémie chez les humains (CRIC, 1987; CRIC, 1995; CRIC, 2004). Au Québec, la valeur plafond pour le formaldéhyde est de 2 ppm (province de Québec, 2007).

5.4.3 Monoxyde de carbone (CO)

Au repos ou à de faibles niveaux d'effort, une exposition à 10 à 20 ppm de monoxyde de carbone peut provoquer des maux de tête (Tableau 2). D'autres contaminants présents dans la fumée peuvent aussi provoquer des maux de tête. De plus, une mauvaise alimentation, la déshydratation ou le stress thermique (qui ont tous été rapportés chez les pompiers forestiers des États-Unis) peuvent de même provoquer des maux de tête.

Des études sur des humains au repos et exposés au monoxyde de carbone ont révélé une augmentation du débit cardiaque à plus de 5 % de COHb (Ayres *et al.*, 1969; Stewart *et al.*, 1973). Kizakevich *et al.* (2000) ont étudié 21 jeunes hommes en santé et exposés à différents niveaux de COHb (5 %, 10 %, 15 % et 20 %). À chacun des niveaux d'exposition, les sujets étaient soumis à un exercice d'intensité croissante pendant un total de 15 minutes. Chaque période d'exposition était précédée d'une période de récupération et de repos. Comme dans les études précédentes, le débit cardiaque des sujets au repos

augmentait à plus de 5 % de COHb. On a également constaté qu'une brève période d'exercice modéré à des niveaux plus élevés de COHb pouvait nuire à la contractilité cardiaque, mais il était peu probable qu'il en résulte une irritation du myocarde ou un changement pathologique significatif dans le rythme ou la forme des courbes d'ECG (Kizakevich *et al.*, 2000).

La TLV_{TWA} de 25 ppm de l'ACGIH correspond à un indice biologique d'exposition de 3,5 % de carboxyhémoglobine et vise à prévenir tout changement de comportement neurologique néfaste de même qu'à maintenir la capacité d'exercice cardiovasculaire des travailleurs au repos ou fournissant un faible niveau d'effort. Lorsque le niveau d'effort augmente, un individu absorbe plus de CO, de sorte que la limite d'exposition doit être ajustée à la baisse dans le cas des pompiers forestiers afin d'empêcher que les niveaux de COHb dépassent 3,5 % à un niveau d'effort maximal (Austin, 2001a; Scarino et Tardif, 2005). Par ailleurs, les signes et les symptômes peuvent être encore plus prononcés à des niveaux d'effort élevés que ceux présentés dans le Tableau 2, et ce, pour tout niveau de COHb, en raison de la plus grande demande d'oxygène du corps en période d'exercice.

Au Québec, la valeur d'exposition admissible pour le monoxyde de carbone est de 35 ppm (province de Québec, 2007).

Tableau 2. La carboxyhémoglobine (COHb) et signes et symptômes connexes

% COHb ^a	Signes et symptômes ^b au repos ^c
< 3	Aucun symptôme.
3-6	Légère diminution de la capacité d'exercice (de 5 à 7 %).
4-17	Légère diminution du temps d'exercice chez les jeunes hommes en santé durant un exercice ardu. Confusion. Diminution de la perceptivité visuelle, de la dextérité manuelle, de la capacité d'apprentissage ou de la performance dans des tâches telle que la conduite automobile.
10-20	Tension au front, possibilité d'un léger mal de tête et dilatation des vaisseaux cutanés.
16-20	Mal de tête et potentiel évoqué visuel anormal.
20-30	Mal de tête, douleur lancinante aux tempes, propension à la fatigue et possibilité de vertige.
30-40	Fort mal de tête, faiblesse, vertige, confusion, vue affaiblie, nausée, vomissements, effondrement et syncope.
40-50	Comme ci-dessus, mais de façon plus marquée. Pouls accéléré et fréquence respiratoire accrue.
50-60	Pouls accéléré et fréquence respiratoire accrue, coma, convulsions intermittentes, respiration de Cheyne-Stokes et risque de mort.
60-70	Coma, convulsions intermittentes, rythme cardiaque et fréquence respiratoire en baisse, condition létale si non traitée.
70-80	Pouls faible, respiration lente, insuffisance respiratoire et mort dans les heures qui suivent.
80-90	Mort en moins d'une heure.
> 90	Mort en quelques minutes.

^aPourcentage de carboxyhémoglobine chez des sujets au repos, sauf indication contraire.

^bStewart (1973, 1975a,b), Horvath (1975), Shephard (1983), CNRC (1985).

^cDes signes et des symptômes peuvent apparaître à des niveaux plus faibles de COHb durant l'exercice, lorsque le corps réclame davantage d'oxygène.

5.4.4 Acroléine

On a rapporté qu'une exposition à 5,5 ppm produit, après 60 secondes, une intense irritation et un larmoiement marqué (Henderson et Haggard, 1943). Une exposition à 1,8 ppm provoque une légère irritation des yeux après 1 minute et un larmoiement abondant après 4 minutes (CNRC, 1981). Chez des volontaires exposés pendant 5 minutes, des concentrations de 2,0 à 2,3 ppm ont produit une grave irritation (Darley *et al.*, 1960). Une exposition de 10 minutes à 8 ppm ou de 5 minutes à 12 ppm provoque une irritation extrême décrite comme étant « à la limite du tolérable » (Sim et Pattle, 1957). Au Québec, la valeur plafond pour l'acroléine est de 0,3 ppm (province de Québec, 2007).

6. ÉPIDÉMIOLOGIE ET SURVEILLANCE MÉDICALE

6.1 Épidémiologie

Il n'existe aucune étude épidémiologique sur les pompiers forestiers, ni au Québec ni ailleurs.

Entre 1910 et 2004, on a enregistré aux États-Unis 918 décès liés au travail chez les pompiers forestiers (NIFC, 2003). Entre 1990 et 1998, les crises cardiaques venaient au troisième rang (28,21 %) des causes de décès chez les pompiers forestiers, derrière les brûlures (29 %) et les accidents d'avion (30,23 %) (MTDC, 1999a; NIFC, 2003). Les pompiers volontaires étaient plus susceptibles que tout autre groupe de périr dans un feu de forêt : volontaires (31 %), fédéraux (26 %), entrepreneurs (21 %), d'État (14 %), municipaux ou de comté (5 %), privés (2 %) et militaires (1 %). Les crises cardiaques comptaient pour 42 % des décès chez les pompiers forestiers volontaires, contre 15 % au sein des organismes fédéraux et 11 % dans les organismes d'État. Le stress thermique comptait quant à lui pour 11 % des décès au sein des organismes d'État. La Figure 6 montre le total des crises cardiaques et des décès liés au travail chez les pompiers forestiers aux États-Unis entre 1910 et 2004, tandis que la Figure 7 montre le nombre de crises cardiaques liées au travail dans les différents groupes de pompiers forestiers : volontaires, fédéraux, d'État, municipaux ou de comté, privés, entrepreneurs et autres (NIFC, 2003). On peut émettre l'hypothèse que le nombre apparemment plus élevé de crises cardiaques chez les pompiers forestiers volontaires s'explique par une moins bonne condition physique que chez les pompiers de carrière et d'autres facteurs d'ordre personnel. Plus de données sont toutefois nécessaires avant de chercher à interpréter les données ci-dessus (p. ex., nombre total de pompiers dans chaque groupe et nombre total d'heures d'activités liées à leurs fonctions).

Les pompiers de bâtiments appelés à éteindre des feux de forêt pourraient être plus à risque de mourir des suites du stress ou d'une crise cardiaque que les pompiers forestiers. Des 147 décès de pompiers enregistrés entre 1978 et 1987, 111 sont survenus en phase de suppression, dont 64 chez des pompiers municipaux (NWCG, 1990). Plus de la moitié de ces décès chez des pompiers municipaux étaient dus au stress et à l'épuisement (NWCG, 1990). Néanmoins, les preuves épidémiologiques de maladies cardiovasculaires accrues chez les pompiers de bâtiments se sont avérées non concluantes (Guidotti, 1992; Guidotti et Clough, 1992; Guidotti, 1993; CNMP, 1994; Guidotti, 1995; Steenland, 1996; Haas *et al.*, 2003). Dans une récente étude sur les pompiers municipaux du Massachussets, environ 75 % des retraites étaient dues à des coronaropathies (Holder *et al.*, 2006). On a découvert que les activités de suppression comptaient pour 43 % des tâches en fonction qui menaient à la retraite, et constaté une augmentation par un facteur de 6,4 du risque relatif d'incident cardiovasculaire en situation de réponse à une alarme. Il s'agit là d'une observation notable, dans la mesure où les pompiers municipaux passent de 1 à 5 % de leur temps de travail à combattre des incendies (Austin *et al.*, 2001a; Kales *et al.*, 2007). Une prévalence élevée de risques cardiovasculaires personnels (46 % d'obésité, par exemple) a aussi été constatée chez les pompiers municipaux (Holder *et al.*, 2006). Une récente étude cas-témoin sur les pompiers étasuniens a révélé qu'un risque accru de décès des suites d'une coronaropathie était lié aux activités de suppression (OR 12-136), aux situations de réponses à une alarme (OR 3-14), à l'entraînement physique (OR 3-7) et au retour d'une intervention suscitée par une alarme (OR 2-10) (Kales *et al.*, 2007). Ces études suggèrent que certaines activités de lutte contre les incendies augmentent les risques d'incident

cardiovasculaire chez les pompiers prédisposés. Cependant, l'importance relative d'un haut niveau d'activité physique et de l'exposition à la fumée (plus particulièrement au monoxyde de carbone) dans l'augmentation du risque de crise cardiaque chez les individus prédisposés en situation de lutte contre l'incendie reste inconnue.

Étonnamment, les études sur les animaux n'ont pas révélé que la fumée de bois était un puissant facteur de cancer du poumon (Liang *et al.*, 1988; Reed *et al.*, 2006), ce qui concorde avec les études épidémiologiques sur les pompiers municipaux, qui n'ont pas réussi à démontrer un lien probant entre l'exposition professionnelle à la fumée et le cancer du poumon. Les risques professionnels de tumeur au cerveau, aux reins et à la vessie chez les pompiers ont été étudiés par l'IRSST (McGregor, 2005a; McGregor, 2005b; McGregor, 2005c).

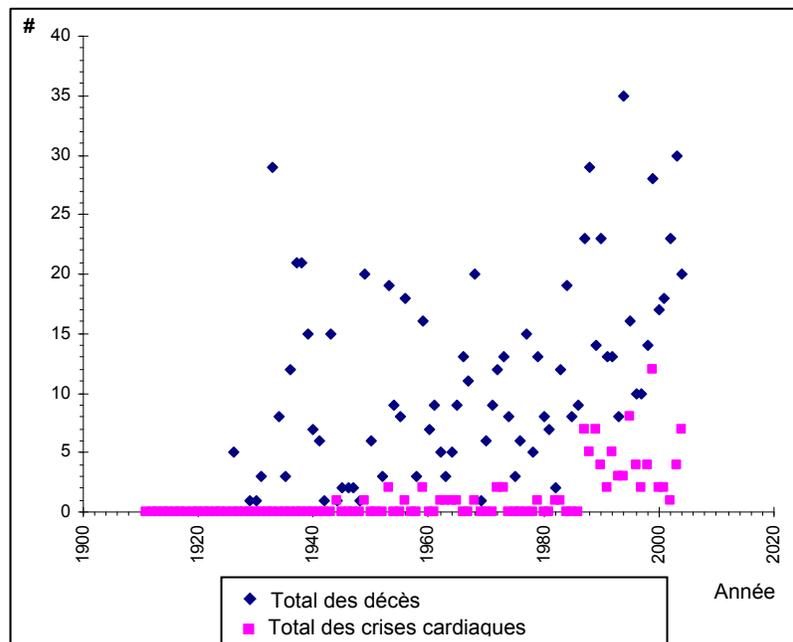


Figure 6. Nombre total de crises cardiaques et de décès liés au travail chez les pompiers forestiers entre 1910 et 2004. Adapté de données du NIFC, 2003.

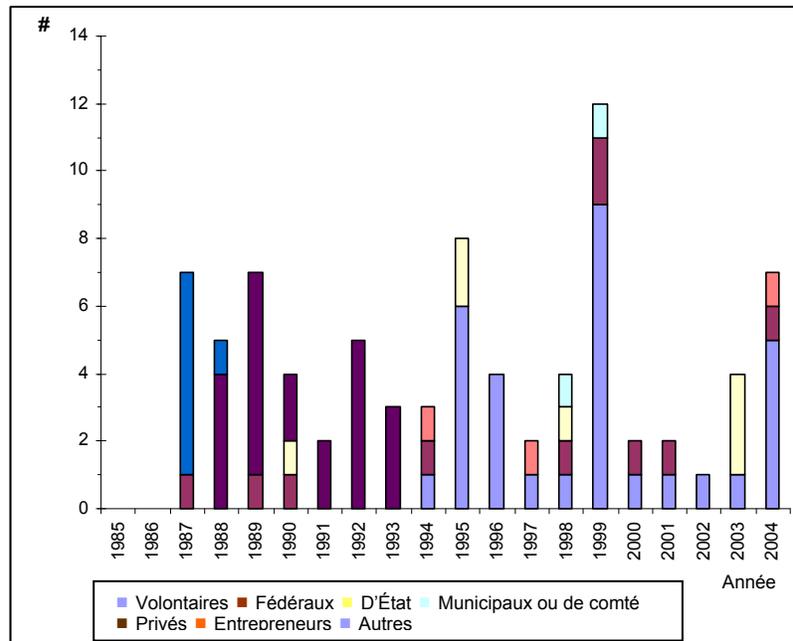


Figure 7. Crises cardiaques liées au travail pour différentes catégories de pompiers forestiers entre 1985 et 2004. Données adaptées du NIFC, 2003.

Bien que les études épidémiologiques sur les pompiers municipaux aient trouvé des liens statistiquement significatifs entre la lutte contre les incendies et diverses formes de cancer – vessie, cerveau et système nerveux, côlon, œsophage, génito-urinaire (ensemble), reins, foie, lymphatique/hématopoïétique, mélanome, myélome multiple, lymphome non hodgkinien, prostate, rectum, testicules et uretère (Decoufle, 1977; Milham, 1983; Eliopoulos, 1984; Vena et Fielder, 1987; Howe et Burch, 1990; Sama *et al.*, 1990; Beaumont *et al.*, 1991; Grimes *et al.*, 1991; Demers *et al.*, 1992; Guidotti et Clough, 1992; Guidotti, 1993; Aronson *et al.*, 1994; Demers *et al.*, 1994; Tornling *et al.*, 1994; Guidotti, 1995; LeMasters *et al.*, 2006; Bates, 2007) –, les résultats ne sont pas uniformes d’une étude à l’autre. Cependant, une récente revue de la littérature épidémiologique par le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) de l’Organisation mondiale de la santé (OMS) a révélé que le risque relatif par rapport à la population en général était uniformément plus élevé pour le cancer des testicules, le cancer de la prostate et le lymphome non hodgkinien (Straif *et al.*, 2007).

L’observation selon laquelle les pompiers municipaux passent seulement de 1 à 5 % de leur temps de travail (18 à 90 heures par année) à combattre des incendies (Austin *et al.*, 2001a; Kales *et al.*, 2007) et le fait que les niveaux d’exposition à de nombreux agents potentiellement cancérigènes puissent être relativement faibles suggèrent que la fumée pourrait constituer un mélange cancérigène exceptionnellement puissant. Cette hypothèse doit toutefois être abordée avec prudence, puisque l’estimation du temps passé à combattre des incendies repose sur des données recueillies depuis le milieu des années 1990, alors que les données épidémiologiques datent de décennies antérieures, au cours desquelles les pompiers pourraient avoir passé plus de temps à combattre des incendies et n’avoir eu recours que peu ou pas à une forme de protection respiratoire. Bien qu’une récente étude sur les pompiers californiens ait trouvé peu de preuves de changement avec le temps pour

les périodes de 1988 à 1995 et de 1996 à 2003, la protection respiratoire était en vigueur au cours de ces deux périodes (Bates, 2007). Le benzène est présent dans la fumée de pratiquement tous les feux, et aux niveaux d'exposition types de la lutte contre les incendies, il s'agit d'un agent causal plausible en ce qui a trait au risque de leucémie accrue chez les pompiers (Austin, 2002). D'autres études sont requises pour clarifier la question du pouvoir cancérigène de la fumée des feux aussi bien de bâtiments que de forêt.

Les expositions des pompiers forestiers sont intermittentes, mais ils peuvent passer jusqu'à 755 heures par saison à combattre des incendies, soit de 8 à 42 fois plus que les pompiers municipaux. Bien que l'intensité de la fumée à l'intérieur d'un bâtiment en flammes puisse être plus élevée que celle dont les pompiers forestiers font l'expérience, les pics d'exposition de ces derniers pourraient être plus élevés que ceux de leurs homologues municipaux dès lors qu'ils ne portent pas de protection respiratoire. Compte tenu de ce qui précède, il serait raisonnable de supposer qu'il y a un lien entre la lutte contre les feux de forêt et le cancer. Il est impératif que des études épidémiologiques soient menées sur les pompiers forestiers pour explorer cette possibilité.

6.2 Surveillance médicale

Il n'y a pas d'études de surveillance médicale des pompiers forestiers au Québec. Les seules données disponibles, tirées des dossiers de la SOPFEU, révèlent qu'en six ans, soit de 2000 à 2005, il y a eu au total six accidents liés au travail et comportant une inhalation de fumée : deux en 2002, deux en 2003 et deux en 2005 (Drouin, 2006). Dans deux de ces cas, il s'agissait d'asthme aggravé par la fumée. Dans un cas, survenu en Colombie-Britannique durant l'application d'un plan d'entraide, le sujet avait du mal à respirer et vomissait. Des six cas, deux sont survenus en cours de déplacement au sol, un en hélicoptère, un en maniant une pelle et deux en cours de suppression au moyen d'un boyau d'arrosage. Un septième cas, celui-là de bronchite, est survenu en 2003 en cours de suppression au moyen d'un boyau d'arrosage, mais le médecin traitant a établi que l'incident n'était pas de nature professionnelle. Il importe de noter que les cas d'accidents professionnels rapportés ne fournissent aucun renseignement sur la prévalence de symptômes liés à l'exposition à la fumée, et que la SOPFEU ne recueille pas ce genre de données.

Dans une étude du NIOSH sur les pompiers forestiers qui ont combattu l'incendie d'Arch Rock dans le parc national de Yosemite, les symptômes les plus fréquemment rapportés étaient une irritation nasale et des maux de tête (Reh *et al.*, 1994). Dans une étude sur 94 pompiers ayant combattu des incendies dans la Klamath National Forest, 76 % ont rapporté des symptômes respiratoires (toux, respiration sifflante ou souffle court) et 70 % ont rapporté au moins un symptôme neurologique (vertige, étourdissement, mal de tête, perte de conscience, baisse de concentration, confusion ou troubles de la vue) (CDHS, 1990). Les symptômes les plus fréquents rapportés par les équipes de Type II (n=10) sur l'ensemble des quarts de travail étaient une irritation nasale et des maux de tête, mais il n'y avait pas de corrélation entre ces symptômes et les niveaux d'exposition déclarés par les intéressés (Reh *et al.*, 1994). Dans une étude sur l'ensemble des pompiers californiens, l'inhalation de fumée comptait pour 38 % de tous les incidents et maladies rapportés (Service des forêts de l'USDA, 1989). Durant les incendies de Yellowstone, en 1988, les pompiers forestiers ont cumulé 30 000 visites chez le médecin, dont 40 % pour des problèmes respiratoires (Service des forêts de l'USDA, 1989). On a rapporté que les

pompiers forestiers faisaient l'expérience, d'une saison à l'autre, d'une prévalence accrue de l'irritation des yeux et du nez, de la toux, de la production de mucosités et d'une respiration sifflante (Rothman *et al.*, 1991).

Un certain nombre d'études sur les pompiers forestiers ont révélé une diminution de la fonction pulmonaire d'un quart à l'autre et d'une saison à l'autre (CDHA, 1990; Rosado *et al.*, 1990; Letts *et al.*, 1991; NIOSH, 1991; Rothman *et al.*, 1991; Liu *et al.*, 1992; Reh *et al.*, 1994; Betchley *et al.*, 1997; Slaughter *et al.*, 2004). La pertinence médicale des diminutions observées au fil des quarts demeure toutefois incertaine, puisqu'elles sont généralement de moins de 8 % (Ghio *et al.*, 1991). Les données suggèrent que la lutte contre les feux de forêt est liée à une déperdition de la fonction pulmonaire et à une sensibilité accrue des voies respiratoires, et que ces liens sont indépendants d'antécédents de tabagisme, d'asthme ou d'allergies, du nombre d'années actives comme pompier, de l'âge, du sexe ou du type d'équipe (Liu *et al.*, 1992; Reh *et al.*, 1994). Les changements ont toutefois tendance à être faibles, et n'ont pu être mis en corrélation avec les niveaux d'exposition à la fumée déclarés par les intéressés (Reh *et al.*, 1994). On n'a pas non plus pu établir si les baisses de fonction pulmonaire d'un quart à l'autre étaient ou non liées à des changements diurnes (Reh *et al.*, 1994). Des mesures spirométriques ont été effectuées au fil des quarts sur 65 pompiers forestiers tandis que les expositions aux MP_{3,5} (0,2-1,3 mg/m³), à l'acroléine (0,002-0,018 ppm), au formaldéhyde (0,008-0,085 ppm) et au monoxyde de carbone (2,1-10,5 ppm) ont été mesurées tout au long de chaque quart à des brûlages dirigés (Slaughter *et al.*, 2004). Bien que, d'un quart à l'autre, le volume expiratoire maximal par seconde (VEM₁/FEV₁) ait changé de -0,125 l (p<0,001), on n'a pu relier ce résultat de façon significative à l'exposition à l'un ou l'autre des composants de la fumée. L'incapacité à déceler un lien avec l'exposition à la fumée peut être due au fait que les pics d'exposition n'ont pas été mesurés.

On a constaté que d'éventuels facteurs parasites (*confounding factors*) (p. ex., tabagisme, rhume au cours des quatre semaines précédentes, troubles pulmonaires, allergies) n'avaient que très peu d'effet sur la diminution de la fonction pulmonaire d'un quart à l'autre (1997). De même, on a constaté que les covariables d'une saison à l'autre (p. ex., exposition à la fumée avant les tests pré-saison, tabagisme, rhume au cours des quatre semaines précédentes, allergies et prise de médicaments) n'avaient que peu ou pas d'effet sur la diminution de la fonction pulmonaire d'une saison à l'autre, sauf en ce qui concerne l'utilisation du bois pour se chauffer à la maison (Betchley *et al.*, 1997). Ces auteurs ont constaté une amélioration de la fonction pulmonaire de saison en saison, mais ils ont souligné que des études longitudinales étaient requises pour déterminer la présence ou non d'effets chroniques à long terme.

Les ouvriers qui travaillent à la production de charbon de bois présentent des schémas d'exposition comparables à ceux des pompiers forestiers. Leur travail consiste à couper du bois, à l'empiler, à le recouvrir de terre de manière à créer un four de 15 à 90 m³, puis à y mettre le feu. Dans une étude sur les ouvriers du charbon de bois exposés à la fumée de bois pendant 9 à 19 heures/jour et pendant 2 à 4 semaines, on a constaté qu'ils éprouvaient des troubles respiratoires croissants, une déperdition de leur fonction pulmonaire et des maux de tête quotidiens. Les pertes moyennes de fonction pulmonaire observées pour le volume expiratoire maximal par seconde, la capacité vitale forcée, et le débit expiratoire maximal (VEM₁ -0,196 l (-7 %), CVF -1,57 l (-5 %), DEM -4 l/s (-15 %), respectivement) étaient comparables à celles des pompiers forestiers dans les groupes ayant connu les expositions les plus importantes et les plus prolongées (Tzanakis *et al.*, 2001).

Une diminution moyenne du débit expiratoire de pointe (DEP) de 16 à 26 L/min a été observée. Les baisses étaient plus importantes le soir qu'au milieu de la journée, et plus importantes au milieu de la journée que le matin. Compte tenu du plan d'étude, il n'a pas été possible de déterminer si ce schéma diurne était dû à une exposition croissante au fil de la journée ou à une cessation d'exposition au cours de la nuit. En période d'exposition, les travailleurs présentaient des niveaux significativement élevés de toux, de production de mucosités (expectoration), de respiration sifflante, de dyspnée et d'hémoptysie par rapport aux sujets témoins, et ces symptômes étaient aussi nettement accrus par rapport à leur évaluation avant exposition. Tous les travailleurs rapportaient quotidiennement une vive irritation des yeux, du nez et de la gorge de même que des maux de tête durant leur période d'exposition.

En mars 2005, le NIOSH a invité un petit nombre de chercheurs et d'intervenants forestiers à un symposium afin de partager les résultats non publiés d'études en cours et de discuter de l'orientation des futures recherches sur l'exposition professionnelle et la santé des pompiers forestiers (NIOSH, 2005a). Les participants y ont entendu des présentations de Jean-Cox Ganser, Dave Niemi, Denise Gaughan, Sandra Anderson, David Weissman, Brit Rosso, Kevin Jensen, Paul Enright, Steve Leonard, Mark Hoover, Randy Boylstein et Claire Austin. Une étude de surveillance médicale en cours du NIOSH a révélé une déperdition de la fonction pulmonaire au gré des quarts et des saisons, et une augmentation des symptômes respiratoires aigus après les incendies. Ces résultats préliminaires ont amené les auteurs à conclure que « les pompiers forestiers s'exposent à un risque de troubles respiratoires aigus, apparemment associé à la lutte contre les incendies » (Gaughan *et al.*, 2005). Une comparaison transversale des policiers et des pompiers municipaux a révélé que les pompiers ont moins de pneumoprotéines sériques (SP-A) que les policiers en l'absence de différences de CVF, de VEM₁ et de capacité de diffusion pulmonaire entre les deux groupes (Burgess *et al.*, 2003). La pertinence clinique de cette observation reste inconnue, mais les auteurs émettent l'hypothèse que les SP-A diminuent du fait d'une exposition professionnelle chronique par perte de cellules dans les voies respiratoires distales et les alvéoles, et que la spirométrie n'est pas assez sensible pour mesurer cet effet.

La question des pompiers asthmatiques a été abordée au symposium du NIOSH en 2005. La majorité des membres d'équipes participant à l'étude en cours du NIOSH étaient non-fumeurs. Dix participants ont déclaré des antécédents d'asthme diagnostiqué, la maladie étant évolutive chez cinq d'entre eux. Ils ont remplacé les inhalateurs inflammables par des inhalateurs hydrosolubles. La loi interdit d'identifier un groupe global, comme les asthmatiques, et de les écarter d'un emploi donné. Cependant, l'employeur ne permet aux asthmatiques de combattre un incendie que lorsque la maladie est stable et sous contrôle. On a fait remarquer que les pompiers forestiers travaillaient dans un environnement riche en agents allergènes (autres que la fumée et la poussière) du fait de la présence de pollens. On ignore si les conditions d'incendie donnent lieu à une exposition aux agents sensibilisateurs présents dans certains bois (séquoia de Californie, thuya occidentale, pin, cèdre rouge de l'Ouest, frêne, tremble/peuplier, hêtre et chêne) (ACGIH, 2007a). On ne croit pas que la lutte contre les feux de forêt soit à l'origine d'un schéma d'affections restrictives, mais l'on ne s'en demande pas moins s'il y a ou non un lien professionnel avec l'asthme ou une maladie pulmonaire obstructive chronique (MPOC). Le taux d'asthme et de MPOC varie entre 10 et 20 % dans la population en général, de sorte que la présence de 4 ou 5 asthmatiques au sein d'une équipe est préoccupante. Il se peut qu'il existe un sous-ensemble de pompiers qui subissent des dommages cumulatifs au fil de

saisons successives de lutte contre les incendies. Les pompiers forestiers restent en fonction pendant plus d'années qu'auparavant, et en tant que groupe, ils sont plus âgés qu'ils avaient l'habitude de l'être. On se demande donc si l'augmentation de l'asthme ou de la MPOC est le résultat de la lutte contre les incendies ou du vieillissement.

Les chefs d'équipe ont exprimé le désir de savoir quels membres sont asthmatiques. On a souligné que l'identification des asthmatiques était un processus d'établissement d'un bilan de santé, et non un processus de disqualification, et qu'il importait d'amener les gens à ne pas avoir peur de dévoiler leur condition en leur faisant prendre conscience que très peu de leurs semblables s'en trouvent défavorisés vis-à-vis de leur employeur. Les questions à se poser sont les suivantes : Quelles mesures prendre à l'égard d'individus déjà embauchés et qu'on découvre atteints d'une MPOC après, disons 10 ans ? Que faire lorsqu'un asthmatique est identifié lors d'un test pré-embauche ? Est-il nécessaire de confier aux asthmatiques des postes à faible exposition ? Les deux questions clés sont les suivantes : 1) Un asthmatique peut-il faire son travail efficacement et en toute sécurité ? 2) Un asthmatique peut-il remplir des fonctions au sein d'une équipe ou d'un camp sans causer de préjudice indu à l'employeur ? La conclusion était : « Beaucoup de choses peuvent être faites. On ne renvoie pas les gens comme ça, surtout lorsqu'ils ont accumulé connaissances et compétences sur plusieurs années. »

Bien que la surveillance médicale des pompiers forestiers ait jusqu'ici porté presque exclusivement sur les effets respiratoires, il importe de souligner que la fumée est un mélange complexe de substances toxiques ayant des effets aussi bien aigus que chroniques sur de multiples systèmes d'organes. Les risques pour la santé respiratoire ne sont pas les seuls risques toxiques auxquels sont exposés les pompiers forestiers.

Une récente étude a relié des mesures biologiques de produits chimiques dérivés de la fumée de bois à des mesures personnelles d'exposition à la fumée de bois chez les pompiers forestiers (Neitzel *et al.*, 2008). Les changements selon les quarts dans les méthoxyphénols urinaires individuels et sommatifs, ajustés en fonction de la créatinine, étaient fortement liés au CO et, dans une moindre mesure, au lévoglucosane. L'exposition moyenne au CO au cours d'un quart était de 3 ppm. La concentration moyenne de lévoglucosane était de 0,075 mg/m³, soit environ 8 % de la masse des MP_{2,5}.

6.3 Évaluation médicale périodique

Au Québec, tous les pompiers forestiers de carrière sont soumis, avant leur embauche, à une évaluation médicale qui comprend un examen médical, un questionnaire, un test d'urine, une audiométrie, une spirométrie et une radiographie lombo-sacrée. Ils sont également soumis à une évaluation médicale annuelle qui comprend un examen médical et un questionnaire.

La norme 1582 de la NFPA renferme les exigences descriptives d'un programme complet de médecine du travail destiné aux services d'incendie (NFPA, 2007b) et s'applique aux candidats et aux membres des services d'incendie dont la description de travail est fournie dans la norme 1051 de la NFPA, relative aux qualifications professionnelles des pompiers forestiers (NFPA, 2007c), qui définit les exigences de rendement minimal au travail en ce qui concerne les devoirs et les responsabilités liés à la lutte contre les feux de forêt. Les exigences minimales en ce qui concerne l'élaboration, la mise en œuvre et la gestion d'un programme de conditionnement physique à visée sanitaire

sont décrites dans la norme 1583 de la NFPA (NFPA, 2000). Les pompiers doivent obtenir un certificat médical avant de prendre part à l'évaluation de la condition physique décrite dans la norme 1583 de la NFPA. L'International Association of Firefighters (IAFF) et l'International Association of Fire Chiefs (IAFC) sont toutes deux promotrices de programmes médicaux et de conditionnement physique à l'intention des pompiers, ainsi qu'en témoigne l'initiative patronale-ouvrière des services d'incendie en matière de bien-être et de forme physique du Fire Service Joint Labor Management Wellness-Fitness Task Force de l'IAFF. Le Service des forêts des États-Unis a aussi un programme de conditionnement physique destiné aux pompiers.

7. ÉVALUATION DE L'EXPOSITION À LA FUMÉE

Il n'y a pas d'études sur l'exposition à la fumée des pompiers forestiers du Québec ou du reste du Canada. Durant les feux de forêt de 1987 dans le nord de la Californie et l'incendie de forêt de 1989 dans le parc national de Yellowstone, des milliers de pompiers ont éprouvé des problèmes respiratoires. Durant l'incendie de forêt de 1989 dans le parc national de Yellowstone, 12 000 pompiers ont consulté un médecin en raison de problèmes respiratoires, et 600 ont eu besoin de soins médicaux subséquents. En 1988, durant l'incendie de Clover Mist, dans le parc national de Yellowstone, 26 pompiers se sont rendus dans une clinique avec les symptômes suivants : nausée/vomissements (69 %), maux de tête (38 %), irritation des yeux (27 %), toux (23 %), souffle court (19 %) et douleurs à la poitrine (19 %) (Reh et Deitchman, 1988). Les enquêteurs du NIOSH ont attribué les symptômes rapportés au fait que les pompiers avaient été exposés aux sous-produits chimiques issus de la combustion d'un sol et d'un roc riches en soufre, tels qu'on en trouve dans les zones géothermales du parc national de Yellowstone. Une revue de la littérature effectuée en 1991 par le Bureau of Land Management des États-Unis a révélé un besoin critique d'évaluation de l'exposition des pompiers forestiers (Dost, 1991). Les incendies de 1987 à 1989 ont incité le NWCG, le Service des forêts des États-Unis et d'autres organismes connexes à mener des études sur l'exposition à la fumée des pompiers forestiers entre 1989 et 1997. Les résultats de ces études ont été examinés dans le cadre d'une conférence de concertation réunissant le NWCG et le Service des forêts des États-Unis, et au cours de laquelle les participants ont voté une liste de recommandations (NWCG, 1997; MTDC, 1999b). Les résultats de ces études ont aussi été publiés dans divers rapports et articles de revues scientifiques (Driessen *et al.*, 1992; Materna *et al.*, 1992; Materna et Koshland, 1993; Betchley *et al.*, 1997; Reinhardt et Ottmar, 1997; Reinhardt *et al.*, 1999; Reinhardt et Ottmar 2000; Reinhardt *et al.*, 2000; Booze *et al.*, 2004; Reinhardt et Ottmar, 2004; Slaughter *et al.*, 2004). Le rapport de la conférence de concertation réunissant le NWCG et le Service des forêts des États-Unis, en 1997, indiquait que « les études sur l'exposition des pompiers révèlent qu'ils sont parfois exposés à des niveaux de fumée qui dépassent les limites d'exposition admissibles de l'OSHA (Occupational Safety and Health Administration des É.-U.) (NWCG, 1997). Une revue et une analyse de la littérature effectuées par le Service des forêts des États-Unis en 1997 indiquait que « les données sur l'exposition à la fumée sont restreintes sur le plan géographique et sur le plan de la représentativité, et elles portent surtout sur les grands incendies de forêt de l'ouest des États-Unis ou sur les brûlages dirigés des États du nord-ouest bordés par le Pacifique. Les initiatives de collecte de données ont été mal préparées compte tenu de la mobilité et de la réactivité requises pour enregistrer l'exposition à la fumée durant l'attaque initiale. En conséquence, la majorité des études ont produit des mesures duplicatives de l'exposition à la fumée durant les phases ultérieures de la suppression, lorsque l'exposition à la fumée est tenue pour faible. Les exceptions à cette tendance ont révélé un problème restreint mais significatif. L'exposition à la fumée est vraisemblablement la plus élevée durant l'attaque initiale, durant l'attaque directe des incendies par vents forts, et dans les situations de grands incendies qui souffrent d'une faible dispersion atmosphérique. » (Reinhardt et Ottmar, 1997)

7.1 Évaluation visuelle de la fumée

Les pompiers forestiers se fondent sur une estimation visuelle de l'intensité de la fumée et sur le degré d'irritation de leurs yeux et de leurs voies respiratoires pour décider sur le terrain si l'exposition à la fumée est acceptable ou non. Des photographies peuvent illustrer les types d'exposition dont les pompiers font l'expérience, mais elles doivent être interprétées avec prudence. La Figure 2 et les Figures 8 et 9 illustrent la situation lors d'un grand incendie de forêt survenu en 2005 à Chibougamau, où l'auteure a pris une série de photos pour montrer que des clichés pris à quelques secondes d'intervalle ou d'un angle légèrement différent peuvent modifier la perception de la réalité. Compte tenu de cette restriction, la Figure 10 montre différentes situations d'exposition à la fumée auxquelles sont confrontés les pompiers du Québec.

7.1.1 Niveaux de fumée faible, moyen et élevé

Des estimations visuelles de l'exposition à la fumée (faible, moyenne ou élevée) ont été faites selon la distance à laquelle les pompiers croyaient pouvoir voir à travers la fumée (Reh *et al.*, 1994). Une intensité moyenne a été définie comme « suffisante pour faire en sorte qu'il soit difficile de voir au-delà de 100 mètres ». Des discussions avec deux pompiers forestiers de la SOPFEU et les membres du Comité de protection respiratoire, de même qu'une comparaison des photos présentées aux Figures 8 à 13 suggèrent que les pompiers forestiers des États-Unis et du Québec s'accorderaient quand à leur estimation de ce qui constitue un niveau de fumée faible, moyen, élevé ou très élevé. Dans le cadre de l'étude réalisée par le Service des forêts des États-Unis dans l'ouest du pays entre 1992 et 1995, on a tenté de mettre en corrélation la mesure des composants de la fumée et les estimations visuelles de l'intensité de la fumée (Figures 11 à 13). On a demandé à 10 observateurs de qualifier leur exposition de 1) nulle, 2) légère, 3) moyenne, 4) élevée ou 5) très élevée. Statistiquement significatives, quoique hautement variables, des corrélations linéaires ont été constatées entre l'estimation de l'intensité de la fumée par les observateurs et l'exposition mesurée aux $MP_{3,5}$ ($r=0,77$, $n=41$), au monoxyde de carbone ($r=0,60$, $n=58$) et au formaldéhyde ($r=0,62$, $n=56$), les périodes d'échantillonnage durant un maximum de 20 minutes (Reinhardt et Ottmar, 2000). La meilleure corrélation constatée était avec les matières particulaires (Figure 14). La variabilité semblait croître avec l'augmentation de l'intensité de la fumée au-delà d'une exposition légère, et davantage dans le cas du monoxyde de carbone et du formaldéhyde que dans celui des matières particulaires inhalables. Quoi qu'il en soit, les auteurs de cette étude du Service des forêts des États-Unis en sont venus à la conclusion que les observateurs pouvaient visuellement estimer leur exposition à la fumée avec suffisamment de précision pour déterminer si des contrôles administratifs devaient ou non être appliqués et si une protection respiratoire devait ou non être utilisée.

Un pompier ayant travaillé dans des conditions de fumée très élevée souffrait de nausée extrême (Figure 13). On a estimé, à partir de courbes de régression extrapolées (décrites plus loin) qu'il avait été exposé à 58 ppm de monoxyde de carbone, à 0,3 ppm de formaldéhyde et à 6 mg/m^3 de particules inhalables (Reinhardt et Ottmar, 2000). Cependant, les niveaux réels mesurés étaient de 3 à 5 fois plus élevés que les niveaux prédits par les équations de régression. On a constaté que les conditions de fumée auxquelles étaient exposés les pompiers sur la ligne de feu d'un brûlage dirigé étaient suffisamment élevées pour être inconfortables (Figure 14) (Reinhardt *et al.*, 2000).

A.**B.**

Courtoisie de C. Austin

Figure 8. Extinction d'un gros incendie de forêt au Québec – sans respirateur (Austin, 2005). Les photos A et B ont été prises à moins d'une minute d'intervalle, témoignant de la rapidité avec laquelle les niveaux d'exposition peuvent changer en un point donné.

A.**B.**

Courtoisie de C. Austin

Figure 9. Extinction d'un gros incendie de forêt au Québec – sans respirateur (Austin, 2005). Les photos A et B ont été prises à moins d'une seconde d'intervalle, mais d'un angle légèrement différent, témoignant du fait que deux photos d'une même scène peuvent donner une perception différente de l'intensité de la fumée.



Courtoisie de C. Austin et de la SOPFEU

Figure 10. Situations d'exposition à la fumée vécues par les pompiers forestiers du Québec.

MOYENNE

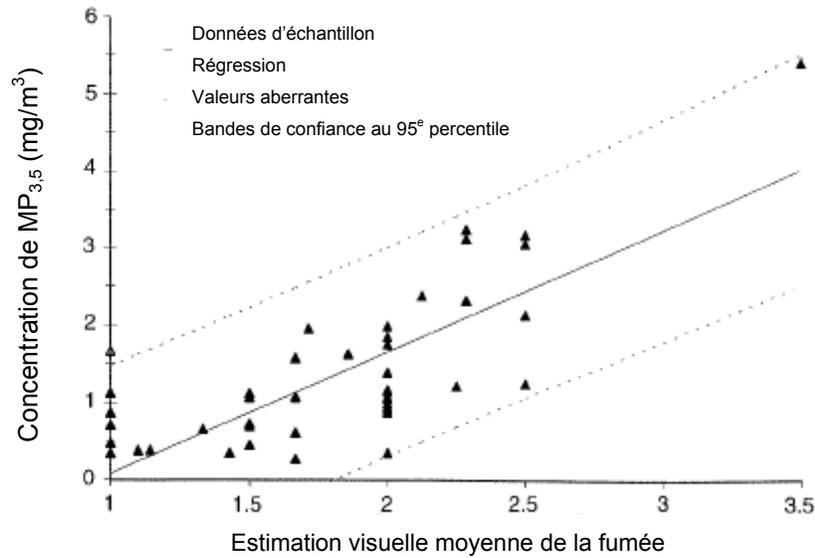
Figure 11. Extinction d'un gros incendie de forêt – sans respirateur (Ottmar, R.D. 1994). Exposition « moyenne » à la fumée (selon des observateurs sur le terrain). Aucun échantillon d'air n'a été recueilli. Les niveaux de contaminants dérivés des courbes de régression extrapolées étaient (Reinhardt et al., 2000) : monoxyde de carbone = 30 ppm, formaldéhyde = 0,15 ppm, particules inhalables = 3 mg/m³.

ÉLEVÉE

Figure 12. Maintien d'une ligne de feu à un brûlage dirigé – sans respirateur (Ottmar, R.D. 1994). Exposition « élevée » à la fumée (selon des observateurs). Aucun échantillon d'air n'a été recueilli. Les niveaux de contaminants dérivés des courbes de régression extrapolées étaient (Reinhardt *et al.*, 2000) : monoxyde de carbone = 44 ppm, formaldéhyde = 0,20 ppm, particules inhalables = 5 mg/m³. Les niveaux réels mesurés étaient de 3 à 5 fois plus élevés que les niveaux prédits (Reinhardt, 2007) (Reinhardt, communication personnelle).

**TRÈS
ÉLEVÉE**

Figure 13. Maintien d'une ligne de feu à un brûlage dirigé – sans respirateur (Ottmar, R.D. 1994). Exposition « très élevée » à la fumée (selon des observateurs). Le pompier (au centre de la photo) a souffert d'une nausée extrême. Aucun échantillon d'air n'a été recueilli. Les niveaux de contaminants dérivés des courbes de régression extrapolées étaient (Reinhardt *et al.*, 2000) : CO = 58 ppm, formaldéhyde = 0,30 ppm, particules inhalables = 6 mg/m³. Les niveaux réels mesurés étaient de 3 à 5 fois plus élevés que les niveaux prédits (Reinhardt, communication personnelle). Les photos des figures 11 et 12 ont été prises à quelques minutes d'intervalle.





Courtoisie du Service des forêts des É.-U.

Figure 15. Les niveaux de fumée étaient désagréablement élevés pour les pompiers maintenant une ligne de feu à un brûlage dirigé où, par épisodes, les concentrations de monoxyde de carbone et d'irritants dépassaient les limites d'exposition professionnelle (Reinhardt et Ottmar, 2000).

7.1.2 Facteurs parasites dans l'estimation visuelle de la fumée.

Outre le type de fumée comme tel (couleur, situation flambante ou couvante, type de combustible), d'autres facteurs compliquent toute estimation visuelle de l'exposition à la fumée. Il s'agit notamment des conditions de luminosité (p. ex., jour ou nuit, temps ensoleillé ou nuageux, à l'ombre ou au soleil) et de la teneur en humidité de la fumée (p. ex., humidité provenant du bouillonnement de combustibles couvants, brouillard, jet de boyaux d'incendie). Le super-brouillard, par exemple, est une épaisse fumée blanche qui s'élève à plusieurs mètres au-dessus du sol (Figure 16). Il offre en général une visibilité de moins d'un mètre et se dissipe normalement peu de temps après le lever du soleil (Achtemeier, 2003). Les cinq hypothèses visant à expliquer le super-brouillard débordent du cadre de ce rapport. Qu'il suffise de dire que la teneur en fumée du super-brouillard varie grandement d'une hypothèse à l'autre. Par exemple, selon une des hypothèses, le super-brouillard ne serait pas un brouillard à proprement parler, mais plutôt une très dense fumée, alors que selon l'hypothèse d'un excès d'humidité, les souches et les troncs couvants dégagent une humidité qui se condense en brouillard en refroidissant (Achtemeier, 2003). Les futures études visant à mettre en corrélation les estimations visuelles de l'intensité de la fumée et les niveaux d'exposition réels devraient tenir compte des facteurs confusionnels.



Courtoisie du Service des forêts des É.-U.

Figure 16. Super-brouillard

7.2 Mesure de la fumée

La fumée des feux de forêt se compose d'un mélange complexe de gaz, de composés organiques volatiles (COV), de composés organiques semi-volatiles (COSV) et de matières particulaires (voir aussi la section 5.1).

7.2.1 Facteurs d'émission

La quantité de carbone dans une biomasse est d'environ 45 %, et indépendamment de la phase de combustion, la plus grande partie du carbone libéré durant la combustion d'une biomasse l'est sous forme de CO₂ (85-90 %) et de CO (Delmas *et al.*, 1995). Les taux d'émission des autres produits de combustion peuvent être calculés à l'aide de la droite de régression entre l'espèce visée et le CO₂ ou le CO (Delmas *et al.*, 1995). Pour les composés émis durant la phase couvante, la corrélation est généralement meilleure avec le CO qu'avec le CO₂ (Delmas *et al.*, 1995). Les facteurs d'émission (mg/kg brûlé), qui prédisent la quantité de composé émise par kilogramme de biomasse brûlée, peut ensuite être calculée à partir des taux d'émission en utilisant la méthode du bilan de masse du carbone.

Les facteurs d'émission pour les produits de combustion de brûlages en plein air ont abondamment été étudiés, et une somme de données considérable est disponible pour les brûlages dirigés et les incendies de forêt, les brûlages agricoles, les brûlages d'ordures ménagères et les brûlages de combustibles liquides (Lemieux *et al.*, 2004). Le Service des forêts

des États-Unis a aussi étudié les émissions de fumée des feux de forêt (Barney et Berglund, 1974; Radke *et al.*, 1990; Hardy *et al.*, 1996).

Bien que les COV, les COSV, les cétones et les aldéhydes soient émis en grandes quantités sous l'effet de la décomposition thermique de la cellulose, la quantité de monoxyde de carbone et de matières particulaires (MP) émise par un brûlage dirigé ou un incendie de forêt l'est encore plus, et ce, par plusieurs ordres de grandeur. Les facteurs d'émission types de CO et de MP dans de telles situations sont respectivement de 114 700 mg/kg et de 16 600 mg/kg. D'autres substances d'intérêt comprennent le formaldéhyde, le méthanol, le 2,3-butadiène, l'acétone, l'acétaldéhyde, le benzène, le 2-méthylfurane, le 2-furaldéhyde, la méthyléthylcétone (MEK), le toluène, l'acroléine, les xylènes, l'acétonitrile, le styrène, le 1,3-butadiène, le benzaldéhyde, les HAP, le phénol et les équivalents toxiques de la dioxine (ETD) (Andreae et Merlet, 2001; Gullett *et al.*, 2003).

De nombreuses incertitudes sont liées aux données utilisées pour calculer les facteurs d'émission. Parmi les sources d'erreur connues : les écarts entre les conditions de combustion, notamment flambantes vs couvantes, les écarts entre les méthodes d'échantillonnage et d'analyse utilisées pour obtenir les données sur lesquelles sont fondés les calculs des taux d'émission, et les matériaux de substrat. Les facteurs d'émission pour les types de feu autres que d'une biomasse (p. ex., feux de bâtiments, brûlage de pneus, d'automobiles, de fibre de verre ou de liquides) peuvent être très différents. La combustion d'une biomasse produit de plus petites quantités de COV, de COSV et de HAP que la combustion de produits fabriqués par l'homme, comme la fibre de verre ou une automobile, mais de plus grandes quantités de carbonyles (p. ex., formaldéhyde). Les plus grandes quantités de formaldéhyde émises par une biomasse en combustion sont vraisemblablement dues aux niveaux élevés d'oxygène moléculaire en lien avec la cellulose (Lemieux *et al.*, 2004). Les feux de pneus, de fibre de verre et, dans une moindre mesure, de combustibles liquides émettent de plus grandes quantités de HAP. Le facteur d'émission des HAP d'un feu de pneus, par exemple, est de 4 363,6 mg/kg, tandis que celui du benzène d'un feu de pneus ou de liquides combustibles est de 2 180,55 mg/kg et de 1 022 mg/kg, respectivement (Lemieux et Ryan, 1993).

7.2.2 Taux de risque normalisés

Les facteurs d'émission ne peuvent être utilisés pour estimer les niveaux d'exposition des pompiers forestiers aux divers composants de la fumée. Cependant, en l'absence de données d'exposition étoffées, les facteurs d'émission peuvent fournir une première approximation des types et des quantités relatives de substances auxquelles peuvent être exposés les pompiers forestiers, de manière à favoriser l'identification de substances préoccupantes. Le Tableau 3 présente les facteurs d'émission connus des composants de la fumée de feux de forêts extratropicaux (Andreae et Merlet, 2001; Lemieux *et al.*, 2004). Voir aussi (Simoneit, 2002). Le dioxyde de carbone (CO₂) et le monoxyde de carbone (CO) comptent pour 90,2 % et 6,60 %, respectivement, de la masse brûlée. Il convient de noter que les données disponibles n'incluent le naphthalène, un important composant de la fumée et un agent cancérigène possible pour les humains.

Les taux de risque ont été calculés pour chacun des composants de la fumée, et normalisés en fonction de la concentration de CO (voir section 2.5 – Méthodes). Les taux de risque normalisés suggèrent que les substances les plus préoccupantes du point de vue

Tableau 3. Facteurs d'émission et taux de risque normalisés pour les feux de forêts extratropicaux

Contaminant	Études sur les facteurs d'émission	% masse fumée ^a	FÉ ^b (mg/kg)	TLV ^c (mg/m ³)	FÉ/TLV	Taux de risque normalisé selon CO	Effets critiques (ACGIH) ^d
formaldéhyde ^e	(Lemieux <i>et al.</i> , 2004)	0,13	2 200	0,36 C ^f	6111	1,5	irritation, sensibilisation, cancer A2
monoxyde de carbone	idem	6,6	114 700	28,6	4005	1,0	anoxie, SCV, SNC, système reproducteur
MP _{2,5}	(Andreae et Merlet, 2001)	0,76	13 000	3	4 333	1,08	
MP (totale)	idem	1,01	17 600	10	1 760	0,4	
acroléine	(Lemieux <i>et al.</i> , 2004)	0,014	240	0,2 C	1200	0,30	irritation, œdème pulmonaire
benzène ^e	idem	0,028	490	2	307	0,077	cancer A1
dioxyde de carbone	(Andreae et Merlet, 2001)	90,2	1 569 000	9000	174	0,044	asphyxie
NO _x (sous forme de NO)	idem	0,17	3 000	5,6	536	0,134	irritation, œdème pulmonaire, système reproducteur, système sanguin, SNC
N ₂ O	idem	0,015	260	50	3	0,001	SNC, hématologique, embryon/foetus
HAP (benzo[a]pyrène) ^e	idem	0,0014	25	0,2 ^g	125	0,031	cancer A1
ammoniac	idem	0,081	1 400	17	80	0,020	irritation
2-furaldéhyde	(Lemieux <i>et al.</i> , 2004)	0,027	460	8	59	0,015	irritation
acétaldéhyde ^e	idem	0,029	500	45 C	11	0,0034	irritation, cancer A3
1,3-butadiène ^e	idem	0,0035	60	4	14	0,0034	cancer A2
méthane	(Andreae et Merlet, 2001)	0,27	4 700	654	7	0,0018	SNC, dépression, sensibilisation cardiaque
méthanol	(Lemieux <i>et al.</i> , 2004)	0,12	2 000	262	8	0,0019	neuropathie, vision, SNC
styrène	idem	0,0075	130	85	2	0,0004	neurotoxicité, irritation, SNC
acétonitrile	idem	0,011	190	34	6	0,0014	peau, poumons
propionaldéhyde	idem	0,008	140	48	3	0,00074	irritation, nasal
toluène	idem	0,023	400	188	2	0,00053	SNC
bromométhane	idem	0,00018	3,2	4	1	0,00021	peau, irritation
méthyléthylcétone	idem	0,026	455	590	1	0,00019	irritation, SNC
acétone	idem	0,032	555	1187	0,5	0,00012	irritation
chlorométhane	idem	0,0029	50	102	0,5	0,00012	reins, SNC, système reproducteur
xylènes	idem	0,012	200	434	0,5	0,00012	irritation
phénol	idem	0,00029	5	19	0,3	6,5x10 ⁻⁵	peau, irritation, SNC, système sanguin
tétrahydrofurane	idem	0,0012	20	147	0,14	3,4x10 ⁻⁵	irritation des voies respiratoires, SNC, hépatique, rénal, cancer A3
iodométhane	idem	0,000035	0,6	12	0,1	1,3x10 ⁻⁵	SNC, irritation
mercure	(Andreae et Merlet, 2001)	5,8x10 ⁻⁶	0,1	0,025	0,0045	1,1x10 ⁻⁶	SNC, reins, système reproducteur

^aPourcentage de la masse brûlée = FÉ÷total mg/kg × 100. ^bFacteur d'émission (mg émis par kg de forêt sec brûlé). ^cValeur limite d'exposition (ACGIH). ^dAmerican Conference of Government Industrial Hygienists. ^eAgent cancérigène connu, probable ou possible pour les humains (CIRC). ^fValeur plafond (concentration à ne dépasser à aucun moment d'une exposition). ^gVolatiles du brai en tant qu'aérosol soluble du benzène.

de l'exposition et de la santé, sont le formaldéhyde – dont le taux de risque normalisé est 1,5 fois plus élevé que celui du monoxyde de carbone, le monoxyde de carbone (1,0), les MP_{2,5} (1,08), l'acroléine (0,3), et les oxides d'azote (0,134). Un deuxième groupe de substances éventuellement préoccupantes, mais dont les taux de risque normalisés sont d'un ordre de grandeur moindre que celui du monoxyde de carbone, comprend le benzène, le dioxyde de carbone (CO₂), les HAP, l'ammoniac et le 2-furaldéhyde. Enfin, un troisième groupe comprend des substances dont les taux de risque normalisés sont au moins deux ordres de grandeur moins élevés que celui du monoxyde de carbone, notamment l'acétaldéhyde, le 1,3-butadiène, le méthane, le méthanol, le styrène, l'acétonitrile, le propionaldéhyde, le toluène, le bromométhane, le méthyléthylcétone, l'acétone, le chlorométhane, les xylènes, le phénol, le tétrahydrofurane, l'iodométhane et le mercure. Les substances pour lesquelles il n'y a pas de TLV comptaient pour moins de 0,12 % de la masse brûlée, et elles ne figurent pas dans le Tableau 3 (le 2,3-butadione, le 2-méthylfurane, le furane, les butyraldéhydes, les pentanones, le 3-méthylfurane, le 2,5-diméthylfurane, l'éthylbenzène, le benzaldéhyde, le benzofurane, les hexanals, les octanones, le 2,4-diméthylfurane, le 2,3-dihydrofurane, le 2-éthylfurane, les heptanones et les heptanals comptaient, par ordre décroissant, pour 0,044 à 0,00019 % de la masse brûlée). Néanmoins, certaines de ces substances sont des agents cancérigènes possibles pour les humains ou confirmés pour les animaux (benzofurane, éthylbenzène, furane, isoprène et tétrahydrofurane), et elles devraient être incluses dans toute évaluation de la cancérigénicité de la fumée au même titre que d'autres agents cancérigènes présents dans la fumée à des concentrations plus élevées (benzène, benzo[a]pyrène, 1,3-butadiène et formaldéhyde).

Les taux de risque normalisés présentés dans le Tableau 3 suggèrent que si les pompiers forestiers sont exposés à 25 ppm de monoxyde de carbone, ils seront surexposés au formaldéhyde et peut-être aussi à des matières particulaires inhalables.

En utilisant les valeurs d'exposition admissibles (VEA) du Québec plutôt que les valeurs limites d'exposition (TLV) dans le calcul des taux de risque, on obtient aussi trois groupes de substances comparables à ceux décrits ci-dessus. Il y a toutefois deux exceptions notables, résultant des écarts d'exposition limite pour le monoxyde de carbone, le formaldéhyde et le benzo[a]pyrène. Le Tableau 4 compare les taux de risque normalisés des substances potentiellement préoccupantes identifiées à partir des facteurs d'émission disponibles. Dans ce cas, les résultats présentés au Tableau 4 suggèrent que si les pompiers forestiers sont exposés à 35 ppm de monoxyde de carbone, ils seront surexposés aux HAP (benzo[a]pyrène).

La conclusion générale qui ressort de cette discussion est que le fait de restreindre les expositions aux limites professionnelles du monoxyde de carbone risque de ne pas protéger les pompiers forestiers contre une surexposition à d'autres substances préoccupantes, et plus particulièrement aux particules inhalables, au formaldéhyde, au benzo[a]pyrène et à l'acroléine. La probabilité que ce soit le cas devient beaucoup plus grande lorsqu'on considère qu'une mesure moyenne pondérée sur 8 heures de l'exposition au monoxyde de carbone voile les pics d'expositions, et que les limites d'exposition professionnelle du formaldéhyde, du benzo[a]pyrène et de l'acroléine sont exprimées sous forme de valeurs plafonds qui s'appliquent précisément aux pics d'exposition.

Il convient d'insister sur le fait que ces calculs reposent sur des données imparfaites, et qu'ils ne sont pas représentatifs de la concentration de fumée dans l'air. Le but de cet exercice est d'identifier les plus importantes substances à échantillonner sur le terrain et les candidats qui

pourraient éventuellement fournir des mesures de substitution de l'exposition à la fumée. Des prélèvements individuels, sur place et en action, sont nécessaires pour

Tableau 4. Comparaison des taux de risque fondée sur les TLV de l'ACGIH et les VEA du Québec

Contaminant	Facteur d'émission (FÉ) (mg/kg brûlé)	TLV de l'ACGIH ^a mg/m ³	VEA du Québec ^b mg/m ³	Taux de risque fondés sur les TLV de l'ACGIH		Taux de risque fondés sur les VEA du Québec	
				(FÉ/TLV)	Normalisé selon CO	(FÉ/TLV)	Normalisé selon CO
HAP (benzo[a]pyrène)	25	0,2 ^c	0,005 ^{cd}	125	0,031	5 000	1,7
monoxyde de carbone	114 700	28,6	40	4 005	1,0	2 861	1,0
formaldéhyde	2 200	0,36 ^d	3 ^d	6 111	1,5	733	0,3
acroléine	240	0,2 ^d	0,7 ^d	1 200	0,3	348	0,1
oxydes d'azote	3 000	5,6	6	536	0,134	536	0,2
dioxyde de carbone	1 569 000	9 000	9 000	174	0,044	174	0,061
benzène	490	2	3	307	0,077	153	0,05
ammoniac	1 400	17	17	80	0,020	80	0,03
2-furaldéhyde	460	8	8	59	0,01	59	0,02
1,3-butadiène	60	4	4	14	0,003	14	0,005
acétaldéhyde	500	45	45 ^d	11	0,003	11	0,004

^aValeur limite d'exposition (American Conference of Government Industrial Hygienists).

^bValeur d'exposition admissible (Québec).

^cVolatiles du brai en tant qu'aérosol soluble du benzène.

^dValeur plafond (concentration à ne dépasser à aucun moment d'une exposition).

déterminer les niveaux d'exposition réels des pompiers forestiers aux composés potentiellement préoccupant. Il se peut aussi que des quantités relatives de ces substances diffèrent des facteurs d'émission mentionnés ci-dessus, selon les conditions de combustion, la température (flambante vs couvante), le transport d'oxygène, l'humidité locale du combustible, la composition du combustible et du sol, et le vent. Ferlay and Picard, par exemple, ont mesuré, sur les lieux de feux de forêt, des niveaux de benzène, de phénol et de 2-furaldéhyde qui dépassaient les limites d'exposition professionnelle (Ferlay et Picard, 1997). En plus des composés typiquement émis dans les brûlages dirigés et les incendies de forêt, les pompiers forestiers peuvent être exposés à des niveaux plus élevés de ces mêmes substances à partir d'autres sources, y compris de brûleurs par gravité, de pneus en combustion, de matières particulaires émanant du sol et de la cendre déplacée en cours de travail, ainsi que de l'échappement des scies mécaniques, des pompes, des génératrices, des véhicules routiers et des aéronefs. Enfin, cette discussion ne tient pas compte des effets additifs et potentiellement synergiques qui ne peuvent qu'exister et qui augmenteraient le risque de toxicité inhérent à l'exposition à la fumée.

7.3 Mesures d'exposition individuelles

7.3.1 Exposition moyenne pondérée en fonction de la durée du quart de travail

Comme il est difficile d'acheminer du matériel d'échantillonnage à la lisière d'un incendie naissant, la plupart des études ont porté sur la collecte d'échantillons individuels lorsque l'intensité de la fumée était faible. Le NIOSH a entrepris cinq campagnes de mesure du genre lors de feux de forêt aux États-Unis (Tableau 5). Un échantillonnage obtenu à l'aide d'un filtre en polytétrafluoréthylène et d'un tube à sorbant a révélé de faibles niveaux de HAP particulaires : acénaphthène (ND-1,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), anthracène (ND-1,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, n=5), benzo(b)fluoranthène (ND-1,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, n=5), fluoroanthène (ND-9,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, n=5) (Reh *et al.*, 1994). Les niveaux relevés de HAP gazeux étaient les suivants : acénaphthène (ND-1,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), anthracène (ND-26,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, n=5) et naphthalène (ND-35,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, n=5) (Reh *et al.*, 1994). Les résultats des études du NIOSH se comparent aux mesures obtenues lors de brûlages expérimentaux en territoire broussailleux au Portugal, où les espèces dominantes étaient *Erica umbellata*, *Erica australis* et *Chamaespartium tridentatum*. Aussitôt après le brûlage expérimental de 19 minutes d'une parcelle de 7 650 m^2 offrant une charge de combustible de 9,9 kg/m^2 essentiellement constituée de broussailles et de quelques arbres isolés, les mesures de fumée effectuées à 75 m des limites de la parcelle ont révélé ce qui suit (Miranda *et al.*, 2005) : MP_{10} (3,0 mg/m^3), CO (0,055 mg/m^3), NO_x (0,45 mg/m^3). Après le brûlage d'une parcelle comparable de 5 151 m^2 pendant 7 minutes, les pics de concentration de $\text{MP}_{2,5}$ mesurés étaient de 3,0 mg/m^3 à une distance de 110 m des limites de la parcelle.

Une plus récente étude du NIOSH a recueilli des échantillons aréolaires de matières particulaires à l'aide d'impacteurs à cascades MOUDI placés à proximité des pompiers durant les phases d'extinction et de brûlage à contrevent sur une période de cinq jours et sans substrat grasieux (Leonard *et al.*, 2007). La concentration de masse totale variait entre 0,75-1,3 mg/m^3 . La taille des particules variait entre 0,042 et 24 μm , environ 78 % de leur masse étant inhalable (**Figure 16**). Les particules ultrafines (0,042-0,24 μm) comptaient pour environ 20 % de la masse, la moitié environ de cette fraction étant composée de nanoparticules ($\leq 0,100 \mu\text{m}$).

Tableau 5. Niveaux d'exposition moyens pondérés en fonction de la durée moyenne du quart de travail des pompiers, tels que mesurés dans les études du NIOSH sur les feux de forêt

Lieu	Incendie	Étude	Niveau de fumée	Monoxyde de carbone		Dioxyde de carbone		Dioxyde de soufre		Dioxyde d'azote		Formaldéhyde		Acéaldéhyde		Acroléine		2-furaldéhyde		Particules inhalables		Particules totales		
				ppm	n ^a	ppm	n	ppm	n	ppm	n	ppm	n	ppm	n	ppm	n	ppm	n	ppm	n	mg/m ³	n	mg/m ³
Parc national de Yellowstone	Incendies de Shoshone, Clover Mist et North Fork	(Reh and Deitchman, 1992)	faible	1,9-7,8		1000		ND-1,2		-	-	ND-0,03		-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1-47,7	
Galatin National Forest	Incendie de Thompson Creek	(Kelly, 1992b)	faible	0-17	20	-	-	0,6-3,0	20	-	-	ND-0,1	20	ND-0,1	20	trace	20	ND-0,04	20	0,04-4,3	26	-	-	
New River Gorge National River, Virginie occidentale	Incendie du mont Gauley	(Kelly, 1992a)	faible	1-9	20	-	-	1-3	20	-	-	0,07	20	ND	20	ND	20	plus de 0,03	20	0,49	20	-	-	
Parc national de Yosemite, Californie	Incendie d'Arch Rock	(Reh <i>et al.</i> , 1994)	faible	1,2-9,4	9	-	-	0,2-2,8	5	ND	5	0,01-0,02	3	0,01-0,02	3	ND-0,01	3	0,002-0,004	3	0,6-1,1	3	-	-	
Parc national de Yosemite, Californie	Incendie d'Arch Rock	(Reh <i>et al.</i> , 1994)	moyen	6,1-24,2	10	-	-	1,1-2,4	6	ND	5	0,06-0,07	2	0,03-0,04	2	0,01	2	0,005-0,008	2	1,3-1,7	3	-	-	
Colorado, Floride, Idaho	40 incendies	(McCammon et McKenzie, 2000)	-	0-22 ^l	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Limite d'exposition professionnelle	TLV de l'ACGIH			25		5000		,25 ^{c b}		3		0,3		25 ^c		0,1 ^c		2		3				
	VEA du Québec			35		5000		2		3		2 ^c		25 ^c		0,3 VECD ^c		2		-				

^aNombre d'échantillons. ^bValeur plafond. ^cValeur d'exposition de courte durée.

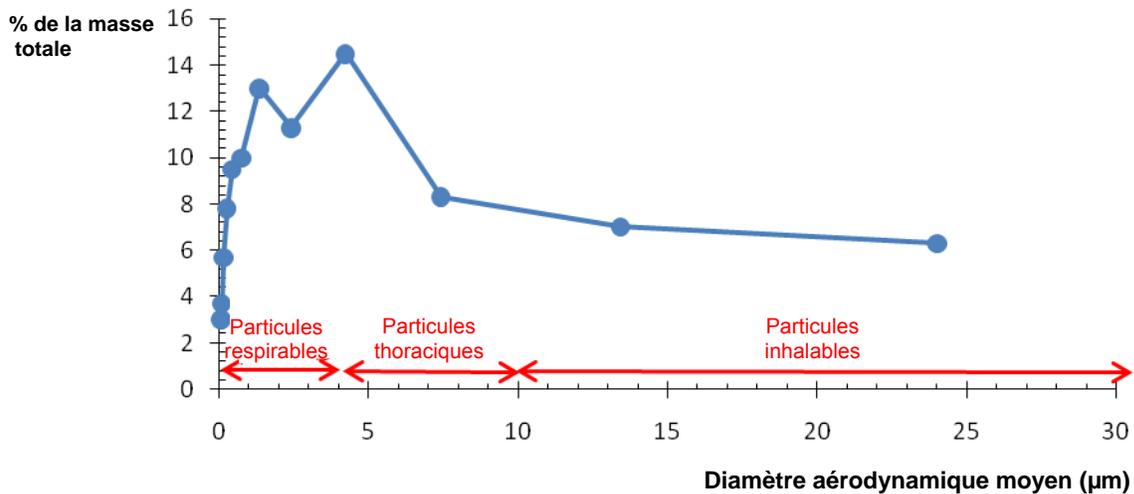


Figure 17. Distribution des masses de particules de fumée. Le pourcentage de la masse totale de particules de fumée a été mesuré durant l’extinction et le brûlage à contrevent d’un feu de forêt. Adapté de Leonard *et al.*, 2007).

Le Service des forêts des États-Unis a mené une étude auprès de 200 pompiers à des brûlages dirigés des États du nord-ouest bordés par le Pacifique (Reinhardt *et al.*, 2000), de 84 pompiers forestiers à 8 incendies d’envergure en région éloignée pendant 17 jours, et de 45 pompiers durant une attaque initiale en zone urbaine ou adjacente pendant 13 jours entre 1992 et 1995 (Reinhardt et Ottmar, 2000). L’intensité de la fumée était généralement « légère » ou entre légère et « moyenne ». Les essences combustibles étaient, par ordre d’importance : chaparral et chêne du nord et du sud de la Californie, graminées et fétuques annuelles de l’Ouest, pin tordu, conifères mixtes, sapin grandissime, mélèze occidental, chêne et pin ponderosa. L’intensité de la fumée variait de « nulle » à « moyennement élevée » (voir figures 11 à 13). Les moyennes géométriques et les écarts-types de quart et sur la ligne de feu pour le monoxyde de carbone, les matières particulaires inhalables, l’ensemble des matières particulaires, le formaldéhyde, l’acroléine, le benzène et un indice d’irritation calculé par les auteurs sont présentés dans le Tableau 6. Les auteurs ont conclu que les pics d’exposition au monoxyde de carbone dépassaient vraisemblablement les limites d’exposition de courte durée lors des attaques directes, des attaques initiales et du maintien de la ligne de feu (Reinhardt et Ottmar, 2000). On estimait par ailleurs que les niveaux d’exposition augmenteraient en situation d’inversion thermique et lorsque les pompiers se trouvent sur les flancs ou sous le vent d’un feu de forêt par jour venteux.

Tableau 6. Niveaux d'exposition moyens pondérés en fonction de la durée moyenne du quart de travail des pompiers, tels que mesurés dans les études du Service des forêts des É.-U. sur les feux de forêt

Type d'incendie	VEMP ^a	Étude	Monoxyde de carbone			Dioxyde de carbone			Formaldéhyde			Acroléine			Benzène			Particules inhalables			Particules totales			Indice d'irritation ^{b,c}	
			ppm			ppm			ppm			ppm			ppm			mg/m ³			mg/m ³			max	moy.
			max	moy.	SD	max	moy.	SD	max	moy.	SD	max	moy.	SD	max	moy.	SD	max	moy.	SD	max	moy.	SD		
Incendies d'envergure (1987-1989)	Ligne de feu	Materna, 1992	80	-	-	-	-	-	0,42	0,16	-	0,052	-	-	-	-	-	5,14	1,75	-	2,71	1,15	-	-	-
Brûlages dirigés (1991-1994)	Quart	Reinhardt, 2000a	38	4,1	-	-	450	-	0,39	0,047	-	0,060	0,009	-	0,058	0,016	-	6,9	0,6	-	-	-	-	4,3	0,4
	Ligne de feu	Reinhardt, 2000a	58	6,9	-	-	519	-	0,60	0,075	-	0,098	0,015	-	0,088	0,028	-	10,5	1,0	-	-	-	-	6,5	0,7
Incendies d'envergure (1992-1995)	Quart	Reinhardt, 2000b	30,5	4,0	2,6	588	465	1,1	0,084	0,013	2,4	0,015	0,001	4,0	0,25	0,004	3,6	2,3	0,5	2,0	4,2	1,5	1,7	1,1	0,2
	Ligne de feu	Reinhardt, 2000b	38,8	2,8	2,5	668	493	1,2	0,093	0,018	2,3	0,016	0,020	3,6	0,38	0,006	3,6	2,9	0,7	1,9	4,4	1,7	1,8	1,4	0,3
Attaque initiale (1992-1995)	Quart	Reinhardt, 2000b	13,1	1,6	3,0	706	391	1,2	0,058	0,006	3,1	0,011	0,001	4,0	0,02	0,003	3,3	1,6	0,022	2,50	1,81	1,39	1,2	0,8	0,1
	Ligne de feu	Reinhardt, 2000b	28,2	7,4	2,2	742	488	1,2	0,092	0,028	3,0	0,037	0,005	4,0	0,04	0,140	3,2	2,5	1,110	1,60	8,64	5,32	1,4	1,4	0,6
Limite d'exposition professionnelle		TLV de l'ACGIH	25			5000			0,3			0,1 ^c			0,5			3			10			1	
		VEA du Québec	35			5000			2 ^c			0,3 VECD			1			-			10			1	

^aValeur d'exposition moyenne pondérée. ^bIndice d'irritation calculé pour la combinaison formaldéhyde, acroléine et particules inhalables. Il importe de noter que cet indice sous-estime vraisemblablement l'effet irritant de la fumée, dans la mesure où ces auteurs n'ont pas inclus tous les irritants présents dans la fumée. ^cLa limite d'exposition professionnelle est dépassée lorsque l'indice d'irritation est supérieur à 1,0.

Un indice d'irritation est dérivé des simples effets additifs de tous les facteurs irritants présents dans la fumée à l'aide de l'Équation 3. Son but est de réduire la TLV de composants individuels :

Équation 3. Formule de mixage additif

$$\frac{C_1}{TLV_1} + \frac{C_2}{TLV_2} + \dots + \frac{C_n}{TLV_n}$$

C = concentration des composants ayant des effets comparables sur la santé d'organes ou de systèmes donnés.

TLV = valeurs pondérées, de courte durée, plafonds ou d'excursion applicables.

L'indice d'irritation calculé par les auteurs dans le Tableau 6 ne tient compte que de trois composants de la fumée : le formaldéhyde, l'acroléine et les particules inhalables. Le résultat risque d'être inférieur à l'indice d'irritation réel, du fait qu'il ne tient pas compte d'autres composants ayant des propriétés irritantes (p. ex., acétaldéhyde, acétone, gaz acides, ammoniac, benzène, 2-furaldéhyde, bromométhane, méthyléthylcétone (MEK), iodométhane, oxydes d'azote, phénol, propionaldéhyde, styrène, tétrahydrofurane et xylènes). L'accroissement des propriétés irritantes des particules de fumée en présence de composants adsorbés n'a pas non plus été pris en considération. Néanmoins, les auteurs de cette étude du Service des forêts des États-Unis ont découvert que les pics d'exposition aux irritants respiratoires dépassaient vraisemblablement les valeurs d'exposition de courte durée en situation d'attaque directe, d'attaque initiale ou de maintien d'une ligne de feu (Reinhardt et Ottmar, 2000). La surveillance de l'exposition de 40 pompiers et de 10 chercheurs à plus de 20 feux en Australie a révélé que l'indice d'irritation (prenant en compte les particules inhalables, le formaldéhyde et l'acroléine) était dépassé pour 30 % des échantillons prélevés (Reisen *et al.*, 2007).

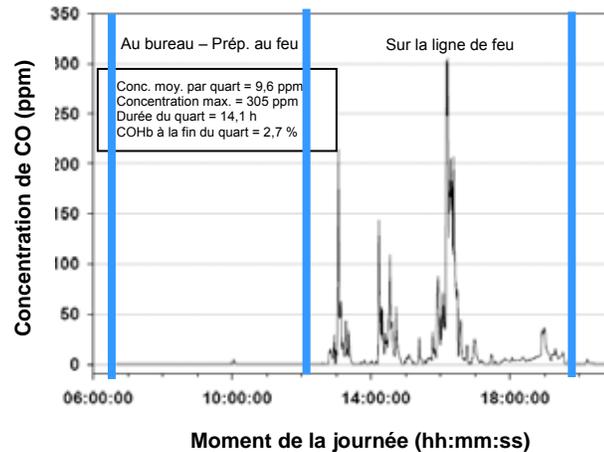
Des résultats antérieurs de brûlages dirigés montrent que le personnel de réserve compte parmi les groupes les plus exposés. Cependant, il y a peu de données publiées sur les expositions liées aux tâches. Bien que les auteurs estiment que les données ont été recueillies dans des conditions moyennes de lutte contre les feux de forêt, la majorité des échantillons prélevés dans le cadre d'incendies d'envergure l'ont été entre le milieu et la fin des opérations. Les données ne sont donc pas représentatives des niveaux de fumée plus élevés qui peuvent prévaloir durant les phases de suppression antérieures. Les auteurs indiquent que la distribution de ces mesures d'exposition moyennes pondérées par quart de travail est aussi biaisée à la baisse, car les pompiers forestiers vivent beaucoup plus de périodes de faible exposition que d'exposition élevée au cours d'une saison. Des discussions avec des pompiers de la SOPFEU suggèrent que c'est aussi le cas au Québec. Les auteurs indiquent par ailleurs que ces données pourraient ne pas être représentatives des situations de lutte contre les feux de forêt dans l'ouest des États-Unis, car les individus échantillonnés appartenaient généralement à la même équipe pour un feu donné, d'autant que les données n'ont été recueillies des jours consécutifs que dans le cadre de huit feux.

Dans le cas des mesures d'attaque initiale, la valeur d'exposition moyenne pondérée par quart rapportée est aussi biaisée à la baisse, car les pompiers visés ne passaient en moyenne que 3,3 heures sur la ligne de feu contre 10,3 lors d'incendies d'envergure. Compte tenu de ces limitations, l'évaluation du risque publiée par le Service des forêts des États-Unis (Booze *et al.*, 2004) demande à être revue.

Si l'on fait la moyenne des concentrations de substances toxiques mesurées auxquelles les pompiers forestiers sont exposés au cours d'un quart, d'une saison ou d'une carrière, et si on les compare aux valeurs limites d'exposition moyennes pondérées (TLV_{TWA}), les niveaux d'exposition semblent effectivement assez bas. Cependant, compte tenu des habituels schémas d'exposition élevée par intermittence, cette forme de manipulation de données ne fournit pas la méthode d'évaluation du risque la plus appropriée en ce qui concerne l'exposition des pompiers forestiers, d'où l'apparition d'effets aigus et chroniques. Il est en outre nécessaire de mesurer les expositions de courte durée et de comparer les résultats aux valeurs limites d'exposition (TLV), aux valeurs d'exposition de courte durée par tranche de 15 minutes (TLV_{STEL}), aux valeurs plafonds lorsqu'elles sont disponibles, ou aux limites d'excursion (trois fois la TLV_{TWA}). Là où des données liées à des tâches précises ont été recueillies pour un groupe de pompiers forestiers, il est probable qu'elles présentent une distribution log-normale et que les résultats sommaires sont convenablement exprimés sous forme de moyenne géométrique \pm l'écart-type géométrique. Cependant, lorsqu'il s'agit d'évaluer les risques chroniques pour la santé, la moyenne arithmétique – toujours plus grande que la moyenne géométrique – devrait être comparée à la TLV (Mulhausen et Damiano, 1998; Ignacio et Bullock, 2006). Dans le cas des composés dont les effets sont aigus, la mesure sommative appropriée à utiliser est la limite supérieure de l'intervalle de confiance à 95 %. Les données d'exposition devraient donc faire état de la moyenne arithmétique, de l'écart-type (SD) et du nombre d'échantillons (n). Ainsi les données du Tableau 6 sous-estiment-elles les expositions par rapport aux limites d'exposition professionnelle pertinentes.

7.3.2 Les pics d'exposition à la fumée

Les résultats d'une autre étude du NIOSH illustrent l'importance de mesurer les expositions de courte durée, et non seulement les expositions moyennes pondérées par quart (McCammon et McKenzie, 2000). Un enregistreur de données a été utilisé pour enregistrer les pics d'exposition et les expositions moyennes pondérées par quart au monoxyde de carbone durant les activités de lutte contre 41 incendies au Colorado, en Floride et en Idaho. Tandis que les niveaux d'exposition moyens par quart au monoxyde de carbone étaient de 3,3 ppm (0-22 ppm, SD 5,2, n=40), les pics d'exposition moyens étaient de 88 ppm (1-392 ppm, SD 116, n=40). Un enregistreur supplémentaire porté par un chauffeur et opérateur de pompe a enregistré une moyenne de 6 ppm de CO avec un pic à 450 ppm. Une étude d'exposition de 5 semaines du Service des forêts des États-Unis à des brûlages dirigés a utilisé des enregistreurs de données en temps réel pour mesurer les pics d'exposition au monoxyde de carbone et aux matières particulaires. La nature intermittente des pics d'expositions est illustrée à la Figure 18 et à la Figure 18 (Edwards *et al.*, 2005; Naeher, 2006; Naeher *et al.*, 2006). On voit aussi, à la Figure 18, un exemple d'un pic d'exposition à 305 ppm de CO, alors que la concentration moyenne de monoxyde de carbone pondérée par quart était de 9,6 ppm (Naeher *et al.*, 2006).



Courtoisie de R. Edwards

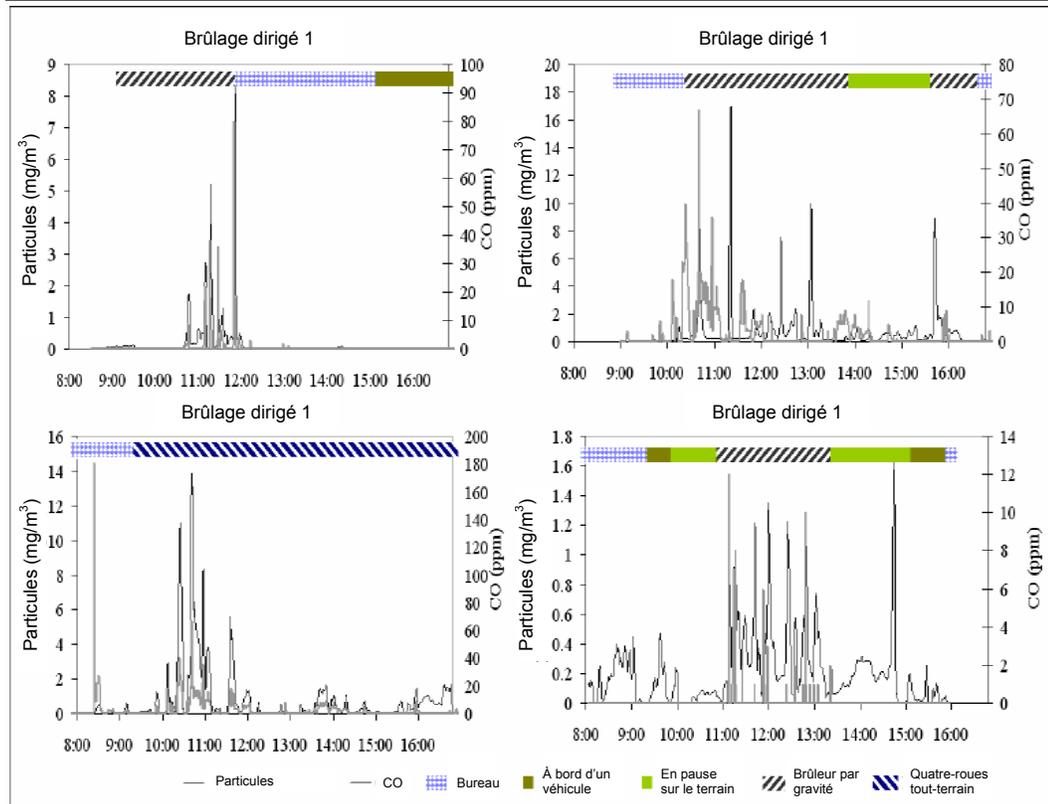
Figure 18. Exposition intermittente des pompiers forestiers au monoxyde de carbone sur la ligne de feu (Naeher *et al.*, 2006).

La Figure 18 illustre la variabilité élevée du monoxyde de carbone et des matières particulaires dans les situations auxquelles sont exposés les pompiers forestiers (Edwards *et al.*, 2005). Tandis que les concentrations maximales de $MP_{2,5}$ et de monoxyde de carbone pouvaient atteindre 17 mg/m^3 et 68 ppm, respectivement, les moyennes par quart étaient de $0,16$ à $0,67 \text{ mg/m}^3$ et de 0,05 à 4,4 ppm. Les hausses et les baisses de niveaux de matières particulaires et de monoxyde de carbone coïncident parfois, mais pas toujours. Il est possible que cette non-concordance soit due à des fluctuations dans la nature de la fumée. Un niveau de particules plus élevé peut aussi être dû au déplacement du sol et des cendres par la marche ou l'utilisation d'outils manuels, alors qu'un niveau plus élevé de monoxyde de carbone peut s'expliquer par l'utilisation de brûleurs par gravité, dans cet exemple. On n'utilise que très rarement des brûleurs par gravité au Québec (Figure 20).

Les auteurs d'une grande étude du Service des forêts des États-Unis ont découvert que les pics d'exposition dépassaient les valeurs d'exposition de courte durée dans environ 50 % des cas (Reinhardt et Ottmar, 2000). Ils ont notamment constaté que les valeurs d'exposition pour les pompiers sur la ligne de feu pouvaient facilement être trois fois plus élevées que les limites d'exposition professionnelle. Une étude australienne a révélé que 8 % des échantillons recueillis à plus de 23 feux de forêt dépassaient 400 ppm pour le CO (Reisen *et al.*, 2006; Reisen *et al.*, 2007). Le NIOSH recommande une valeur plafond de 200 ppm pour le CO. Les pics d'exposition pouvaient atteindre jusqu'à 1 200 ppm. Dans cette étude, 2 % des échantillons pondérés dans le temps dépassaient 30 ppm.

L'étude conjointe du NWCG et du Service des forêts des États-Unis a révélé que certains pompiers étaient exposés à des composants de la fumée qui dépassaient de loin les valeurs limite d'exposition (TLV) ou les valeurs plafonds (P) pour des substances choisies ayant fait l'objet de mesures pendant 20 à 32 minutes à des brûlages dirigés (Figure 7) (Reinhardt and Ottmar 2004). Ces niveaux d'exposition étaient de 3 à 6 fois plus élevés que

les niveaux prédits par extrapolation des courbes d'estimation visuelle de la fumée sur la ligne de feu d'un incendie d'envergure où un pompier a souffert de nausée pour avoir été exposé à une fumée « très dense » (Figure 13). L'étude conjointe du NWCG et du Service des forêts des États-Unis a aussi révélé qu'au moins un tiers des expositions lors d'attaques initiales, d'incendies d'envergure et de brûlages dirigés dépassaient les valeurs d'exposition de courte durée de l'ACGIH (STEL), et leur étaient jusqu'à 10 fois supérieures dans certains cas. On s'attendrait normalement à ce que de telles expositions soient intermittentes, comme l'illustre la Figure 18 et la Figure 18.



Courtoisie de Archives of Environmental and Occupational Health

Figure 19. Exposition des pompiers forestiers aux matières particulaires (MP_{2,5}) et au monoxyde de carbone à un brûlage dirigé avec tâches associées (Edwards *et al.*, 2005). Des brûleurs par gravité (combustible liquide enflammé) sont utilisés pour créer des contre-feux, des brûlages de nettoyage et des brûlages dirigés (voir Figure 20).



Courtoisie de L. Naehar

Figure 20. Pompier forestier utilisant un brûleur par gravité pour dresser un contre-feu. Un mélange enflammé de gazoline et de diesel s'échappe de l'appareil. On n'utilise que très rarement des brûleurs par gravité au Québec.

Composants de la fumée	Unités	Niveau d'exposition	TLV ^b
Particules inhalables	mg/m ³	37	3 (TWA ^c)
Monoxyde de carbone	ppm	179	25 (TWA)
Formaldéhyde	ppm	1,46	0,3 (P ^d)
Acroléine	ppm	0,129	0,1 (P)
Benzène	ppm	0,277	0,5 (TWA)

^aVoir Reinhardt et Ottmar, 2004.

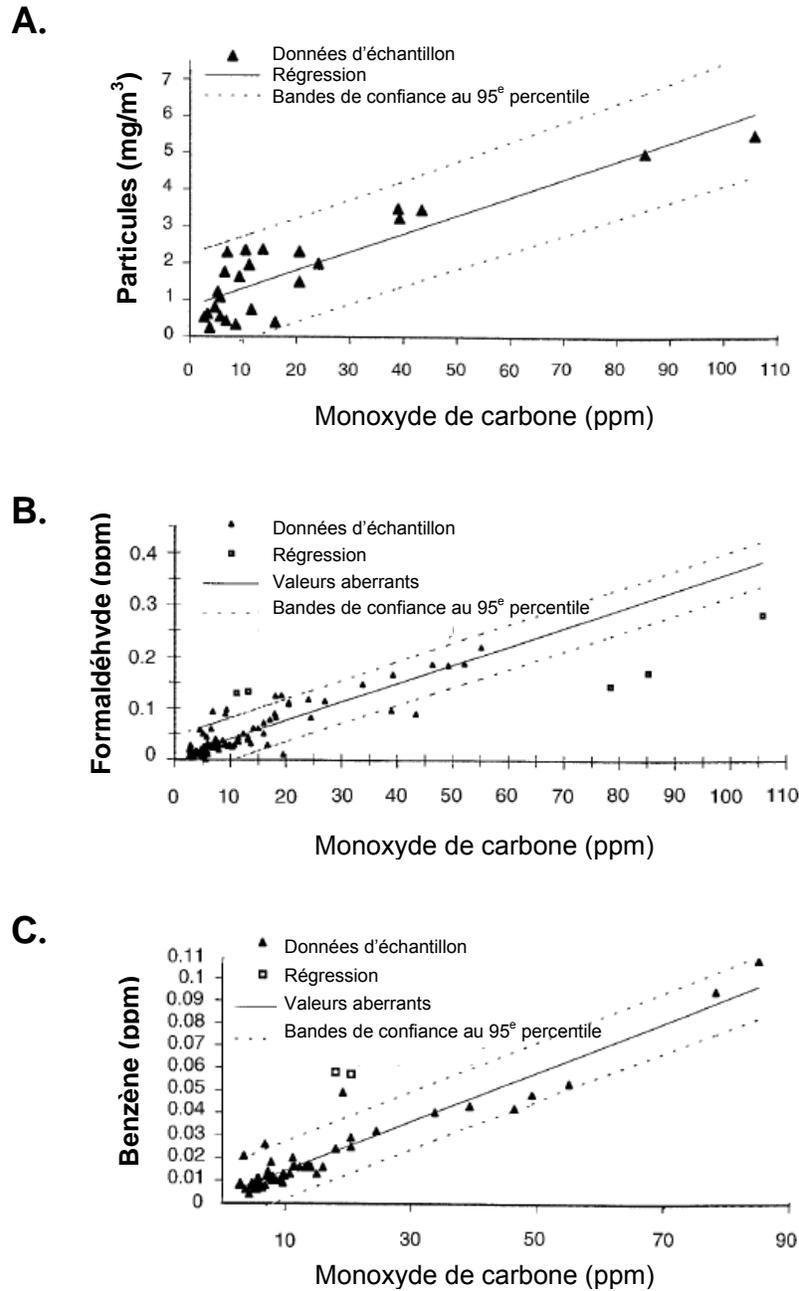
^bValeur limite d'exposition de l'American Conference of Government Industrial Hygienist.

^cMoyenne pondérée sur 8 heures.

^dValeur plafond.

7.4 Le monoxyde de carbone en tant que substitut de l'exposition à la fumée

Il serait extrêmement utile de trouver une corrélation fiable entre un composant facilement mesurable de la fumée, comme le monoxyde de carbone, et d'autres composants préoccupants, de manière à pouvoir l'utiliser comme substitut de l'exposition à ces substances. Dans une étude australienne sur les pompiers forestiers, une bonne corrélation a été observée entre le CO d'une part et les particules inhalables et les aldéhydes de l'autre (Reisen et al., 2007). L'étude de 1992 à 1995 du Service des forêts des États-Unis a aussi révélé des corrélations statistiquement significatives entre le monoxyde de carbone et les composants suivants de la fumée pour des mesures d'exposition individuelles moyennes pondérées lors d'incendies d'envergure (Reinhardt et Ottmar, 2000) : benzène, exclusion faite de l'utilisation de véhicules et de matériel à moteur à combustion ($r=0,95$, $n=54$), PM_{3,5} ($r=0,89$, $n=25$), formaldéhyde ($r=0,89$, $n=103$) et acroléine ($r=0,82$, $n=41$). La corrélation avec l'ensemble des matières particulaires n'était pas bonne. Cela s'explique sans doute par l'apport des particules plus importantes soulevées par le déplacement du sol et des cendres. Malheureusement, la corrélation entre le monoxyde de carbone et les MP_{3,5} était très faible lorsque les niveaux de monoxyde de carbone étaient inférieurs à la valeur limite d'exposition de l'ACGIH (25 ppm). Cependant, les niveaux observés de matières particulaires inhalables étaient tous inférieurs à la TLV de 3 mg/m³ de l'ACGIH lorsque le niveau de monoxyde de carbone était inférieur à 25 ppm ($n=20$) dans cette étude (Figure 20A), tout comme les niveaux de formaldéhyde (valeur plafond de l'ACGIH = 0,3 ppm) et de benzène (TLV de l'ACGIH = 0,5 ppm) (Figures 21B et 21C, respectivement). Lorsque les niveaux de monoxyde de carbone étaient inférieurs à sa TLV, le niveau de formaldéhyde le plus élevé observé était de 0,15 ppm (CO 10-25 ppm), et le niveau de benzène le plus élevé observé était de 0,03 ppm (CO 10-25 ppm). Quoique statistiquement significatives, les corrélations entre les différents composants de la fumée des incendies de forêt étaient plus faibles lors d'attaques initiales en zone urbaine ou à proximité, sans doute en raison de l'influence confusionnelle de la pollution. Une comparaison de ces résultats avec ceux de la Figure 14 suggère que ces échantillons ont surtout été recueillis dans des conditions de fumée « légère » à « moyenne » tout au plus (voir aussi **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Ces courbes de régression ont sous-estimé les niveaux d'exposition à des conditions de fumée dense ou très dense où les concentrations réelles de contaminants étaient de 3 à 5 fois plus élevées que les niveaux prédits.



Courtoisie du Service des forêts des É.-U.

Figure 21. Lien entre le monoxyde de carbone et les niveaux d'autres composants de la fumée. Des corrélations statistiquement significatives ont été observées avec les matières particulaires inhalables ($r=0,89$) et le benzène ($r=0,91$). Les points de données représentent les mesures d'exposition individuelles moyennes pondérées à des incendies d'envergure dans des conditions de fumée surtout « légère ».

8. PROTECTION RESPIRATOIRE

8.1 Pratiques actuelles

La communauté de la lutte contre les feux de forêt exprime depuis les années 1980 ses préoccupations concernant les risques pour la santé à court et à long terme que présente l'exposition à la fumée. La Western Forestry Conservation Association (WFCFA) regroupe environ 500 membres et 40 sociétés et organisations privées et publiques en conservation forestière de l'ouest du Canada et des États-Unis. Lors de son assemblée annuelle du 4 décembre 1990 à Cour d'Alene, en Idaho, la WFCFA a adopté une résolution encourageant vivement « la poursuite et l'achèvement d'études à même de quantifier scientifiquement les risques d'exposition à la fumée des feux de forêt et d'identifier des mesures protectrices adéquates et acceptables » (MTDC, 1991). Une enquête réalisée auprès de 300 employés d'organismes fédéraux et d'État a révélé que 82,2 % des répondants estimaient que les risques liés à la fumée justifiaient une protection respiratoire, surtout lors des activités d'attaque directe (70,4%), de maintien de la ligne de feu (79,8%) et d'extinction (64,8%) (Driessen *et al.*, 1992).

Les appareils respiratoires autonomes (ARA) dont le réservoir d'air se vide en 15 à 30 minutes ne constituent pas une option pour les pompiers forestiers qui travaillent de 12 à 16 heures par jour en terrain accidenté et en région éloignée, et ce, pendant plusieurs jours ou plusieurs semaines. Contrairement à leurs homologues municipaux, les pompiers forestiers ne disposent présentement ni d'une norme de protection respiratoire ni d'un respirateur certifié. En l'absence d'une norme relative aux respirateurs à utiliser dans la lutte contre les feux de forêt, nombre d'appareils non certifiés et non approuvés sont présentement mis en marché et utilisés par certains pompiers forestiers. Dans d'autres cas, des respirateurs certifiés par le NIOSH sont utilisés de façon inappropriée par les pompiers forestiers.

Une enquête réalisée auprès de 63 chefs de pompiers de la Floride a révélé que 46 % des services d'incendie municipaux ne fournissaient aux pompiers ni équipement ni vêtements de protection personnelle en cas de feu de forêt, les principales raisons en étant le coût et la fréquence des feux de forêt (Hill, 2000). Dans bien des cas, les pompiers municipaux engagés dans la suppression de feux de forêt portent un équipement de protection personnelle conçu pour la suppression de feux de bâtiments (Hill, 2000). Cela a pour effet d'accroître les risques de stress physiologique et de blessures thermiques.

Le rapport de la conférence de concertation réunissant le NWCG et le Service des forêts des États-Unis, en 1997, recommandait l'établissement de tests et de critères de rendement en ce qui a trait aux appareils respiratoires filtrants à utiliser lors de brûlages dirigés et de feux de forêt. Plutôt que de conclure qu'une protection respiratoire était ou non requise, il avançait que « la nécessité ou non d'une protection respiratoire exige d'autres études et développements ». Cela dit, reconnaissant le besoin de réduire les expositions à la fumée des pompiers forestiers, il recommandait aussi « des changements à la formation et aux tactiques afin de minimiser davantage les expositions », et l'élaboration d'un programme pilote de protection respiratoire dans le cadre duquel des respirateurs 95N/multi-gaz seraient utilisés sur le terrain à des brûlages dirigés. Une étude de suivi du NIOSH sur le programme de gestion de l'exposition des pompiers a révélé que les pompiers forestiers étaient exposés à des niveaux de CO dépassant les valeurs plafonds ou

d'excursion jusqu'à 25 % du temps qu'ils passaient à lutter contre des incendies (McCammon et McKenzie, 2000). En 1999, la conférence sur la santé et la sécurité des pompiers forestiers du Service des forêts des États-Unis recommandait la collecte de données sur l'exposition à la fumée à l'aide de dosimètres (MTDC, 1999b). Des rapports publiés en 2000 par le Service des forêts des États-Unis concluaient que « nos données suggèrent également que les actuels appareils respiratoires filtrant les vapeurs organiques et les matières particulaires devraient être portés en conjonction avec des dosimètres avertisseurs d'exposition concurrente au CO », et que ceux-ci devaient être utilisés « dans les situations de fumée moyenne à élevée facilement identifiables par la plupart des pompiers » (Reinhardt et Ottmar, 2000; Reinhardt *et al.*, 2000). Et dans un article publié dans une revue scientifique, les auteurs du Service des forêts des États-Unis répétaient : « Nous recommandons l'utilisation de dosimètres électrochimiques parallèlement à celle d'appareils respiratoires filtrants afin d'obtenir un avertissement immédiat sur le niveau de CO en situation de fumée. » (Reinhardt and Ottmar, 2004) À ce jour, le Service des forêts des États-Unis n'a toujours pas donné suite à ces recommandations.

À l'heure actuelle, les différentes organisations responsables de la lutte contre les feux de forêt en Amérique du Nord ne fournissent généralement pas de respirateurs, ni n'en recommandent l'utilisation. L'on sait toutefois que des pompiers forestiers ont l'habitude de couvrir leur visage avec un mouchoir de tête dans le vain espoir de réduire leur exposition à la fumée (Reh *et al.*, 1994). Cette pratique est surtout répandue chez les nouveaux venus; les pompiers d'expérience ne se donnent pas cette peine. Les procédures à suivre en situation d'encerclement du Service des forêts de l'Alberta (AFS) précisent qu'il faut éviter d'inhaler une épaisse fumée et que « se couvrir le nez avec un mouchoir sec peut aider » (AFS, 1999). Plus étonnant encore, le même conseil est donné en cas d'exposition à la fumée de peintures ou de plastiques en combustion : « Une odeur fortement acide résulte normalement de la combustion de peintures ou de plastiques. Le chlorure d'hydrogène est facilement hydrosoluble, et l'on peut réduire l'inconfort en respirant à travers un tissu sec. » (AFS, 1999)

En Californie, le laboratoire Lawrence Livermore distribue depuis plusieurs années des masques respiratoires complets à pression négative équipés de filtres HEPA/P100, de cartouches anti-gaz acides/vapeurs organiques et d'un préfiltre à ses pompiers forestiers (Johnson, 2007). Au cours de la dernière année, on a donné aux pompiers le choix entre un masque complet et un masque ne couvrant que la moitié du visage. En Australie-Occidentale, la FESA dote depuis plusieurs années ses pompiers de carrière de demi-masques à pression négative équipés de cartouches anti-matières particulaires, et a ajouté un filtre anti-formaldéhyde en 2006 (FESA, 2003; De Vos *et al.*, 2006; Parlour, 2007). L'utilisation d'un respirateur est volontaire, et bien qu'une minorité de pompiers préfèrent ne pas s'en servir, le jugeant inconfortable, la plupart des pompiers de carrière s'en prévalent, surtout dans les feux de forêt périurbains de forte intensité et de courte durée, et ils se disent satisfaits des résultats (Parlour, 2007). La FESA se demande présentement si elle doit ou non rendre le port du masque obligatoire pour tous les pompiers de carrière, et elle compte définir des critères relatifs à la distribution de respirateurs pour les pompiers volontaires travaillant dans des conditions similaires.

8.2 Normes actuelles

Les normes applicables en matière de lutte contre les feux de forêt restent muettes en ce qui a trait au recours à une quelconque protection respiratoire (NFPA, 1995; AFS, 1997; ONGC, 1997b; ONGC, 1997a; ONGC, 1998; AFS, 1999). La seule exception à cet égard est l'actuelle norme ISO/CD 16073-2002 sur l'équipement de protection personnel des pompiers forestiers, selon laquelle ils *peuvent* utiliser un masque anti-poussières jetable FFP2 certifié EN149 (ce qui correspond à un respirateur N-95 certifié par le NIOSH) (International Standards Organization, 2002). On ne s'attend pas à ce que cette section soit incluse dans la prochaine édition de la norme ISO, puisque la responsabilité de la protection respiratoire chez les pompiers forestiers sera vraisemblablement transférée à un autre comité (TC94/SC14/WG à TC94/SC15/WG2) (Poulin 2007). Nombre d'autres publications ne font aucune recommandation quant à l'utilisation de respirateurs par les pompiers forestiers (Bollinger et Schutz, 1987; Lara et Vennes, 1998; Lara, 2002; NIOSH, 2004b).

Le 27 février 2007, le National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) des États-Unis a soumis une lettre d'observations au Conseil des normes de la NFPA appuyant l'élaboration d'une norme de protection respiratoire pour les pompiers forestiers. L'auteur soulignait que nombre d'études passées et en cours portaient sur les risques respiratoires et les conséquences sanitaires de la lutte contre les feux de forêt. Il concluait en ces termes : « Il ne semble guère y avoir de doute quant au fait que les risques sont réels, et qu'ils peuvent dans certaines situations et durant certaines périodes de temps dépasser les limites exigeant une protection respiratoire. » (Boord, 2007) Le 20 mars 2007, le Conseil des normes de la NFPA annonçait qu'il avait décidé d'aller de l'avant avec l'élaboration d'une nouvelle norme respiratoire en matière de lutte contre les feux de forêt (NFPA, 2007d; NFPA, 2007a). Elle sera probablement publiée au début de 2011. On anticipe que cette nouvelle norme exigera la filtration du monoxyde de carbone (CO), en plus des vapeurs, gaz, et particules présents dans la fumée.

Il importe de faire une distinction entre la nécessité d'une norme relative au rendement des respirateurs et la nécessité d'une protection respiratoire pour les pompiers forestiers (Austin et Goyer, 2007). Une norme de la NFPA concernant le rendement des respirateurs n'obligerait pas les pompiers forestiers à utiliser un respirateur, non plus qu'elle ne fournirait les directives relatives à son utilisation. Cependant, advenant qu'un pompier forestier ou une autorité compétente détermine qu'une protection respiratoire est requise dans une situation donnée, le respirateur choisi devrait satisfaire aux exigences minimales définies par une future norme de rendement de la NFPA, et être certifié par le NIOSH.

8.3 Options disponibles

Une étude du NIOSH sur de vieux échantillons de mouchoirs de tête a révélé que la dimension des pores du tissu était d'environ 200 µm x 200 µm, soit de 500 à 2 000 fois plus importante que la taille des particules de fumée (0,100-0,400 µm) (Reh *et al.*, 1994). Gaz, vapeurs et matières particulaires respirables et inhalables traverseraient le tissu aussi facilement qu'un moustique une porte ouverte (Figure 21). Il n'y avait aucune indication à l'effet qu'un lavage fréquent et un séchage à l'air chaud réduisent considérablement la dimension des pores du tissu. L'utilisation de mouchoirs de tête en guise de protection respiratoire devrait être interdite (Reh et Deitchman, 1992; Reh *et al.*, 1994).

Les seuls respirateurs approuvés par le NIOSH présentement disponibles et susceptibles d'être utilisés par les pompiers forestiers sont des appareils respiratoires filtrants (ARF) ou des appareils respiratoires filtrants à air propulsé (ARFAP) (Tableau 8). Reste qu'aucun d'eux ne filtre le monoxyde de carbone (CO) et qu'aucun n'est approuvé pour une utilisation en situation de lutte contre un incendie. Sous conditions contrôlées, on a constaté que les demi-masques filtrants à cartouche anti-particulaire (P) ne protègent pas les pompiers contre la toux, la respiration sifflante et le souffle court après 15 minutes d'exposition à une fumée « légère » (De Vos *et al.*, 2006). Bien que les cartouches anti-particulaires/vapeurs organiques (PVO) offrent une meilleure protection, les cartouches anti-particulaires/vapeurs organiques/formaldéhyde sont encore plus efficaces. Anthony *et al.* ont aussi découvert que le formaldéhyde présent dans la fumée des incendies passe à travers les appareils respiratoires filtrants multi-gaz et CBRN (Anthony *et al.*, 2007).

De récentes études ont révélé d'importants écarts d'efficacité entre différents respirateurs certifiés à des fins industrielles pour ce qui est de filtrer les composants toxiques de la fumée. Les appareils filtrants multi-gaz ne sont pas efficaces contre toutes les vapeurs toxiques, en particulier les aldéhydes. Aucun des respirateurs ne filtre le monoxyde de carbone (CO). Tous les respirateurs existants accusent de sérieuses lacunes dans un contexte de lutte contre les feux de forêt. Et même s'ils étaient efficaces, certains pompiers forestiers sont tout naturellement réticents à porter des masques respiratoires à pression négative à un niveau d'effort intense pendant de longues périodes de temps. Un masque complet est généralement plus confortable qu'un demi-masque, et il protège entièrement les yeux. La protection des yeux s'avère essentielle lorsque le niveau de contaminants dépasse la valeur limite d'exposition si cette dernière est fondée sur les effets irritants. Puisque les contaminants qui ont des propriétés détectables, comme l'odeur ou un effet irritant, sont filtrés par les respirateurs, on peut à juste titre s'inquiéter de ce que les pompiers portant de tels appareils puissent s'exposer sans le savoir à de plus hauts niveaux de contaminants toxiques non filtrés par ces appareils qu'ils ne le feraient sans ces appareils. Il pourrait facilement en résulter une surexposition au monoxyde de carbone, avec des conséquences graves, et peut-être même mortelles. Pour éviter cela, un détecteur-avertisseur de monoxyde de carbone devrait être utilisé en conjonction avec les appareils respiratoires filtrants utilisés en situation de lutte contre les feux de forêt.

Le comité technique de l'ISO a conclu que l'équipement de protection personnel (EPP) des pompiers forestiers devait répondre à un équilibre acceptable entre une protection accrue contre les flammes et les températures élevées, et une réduction des hausses de chaleur métabolique et de stress thermique (ISO, 2006). En plus de fournir une protection personnelle qui permet aux pompiers forestiers de faire leur travail sur des périodes prolongées, il doit aussi être suffisamment robuste pour être utilisé dans des conditions extrêmes. Les niveaux d'effort et de stress thermique sont élevés en situation de lutte contre les feux de forêt. Un programme de protection respiratoire et des critères de rendement réalistes en ce qui concerne les respirateurs doivent être élaborés de manière à créer un équilibre entre le besoin de protection respiratoire contre de hauts niveaux intermittents de fumée, le besoin d'un niveau de confort raisonnable en travaillant dans un environnement chaud pendant de longues périodes et en accomplissant des tâches exigeantes en région éloignée, et le besoin de contrôler et d'éteindre des feux de forêt. Une option intéressante pourrait tenir au développement d'un respirateur libre de type ARFAP pour les pompiers forestiers (Johnson *et al.*, 2008).

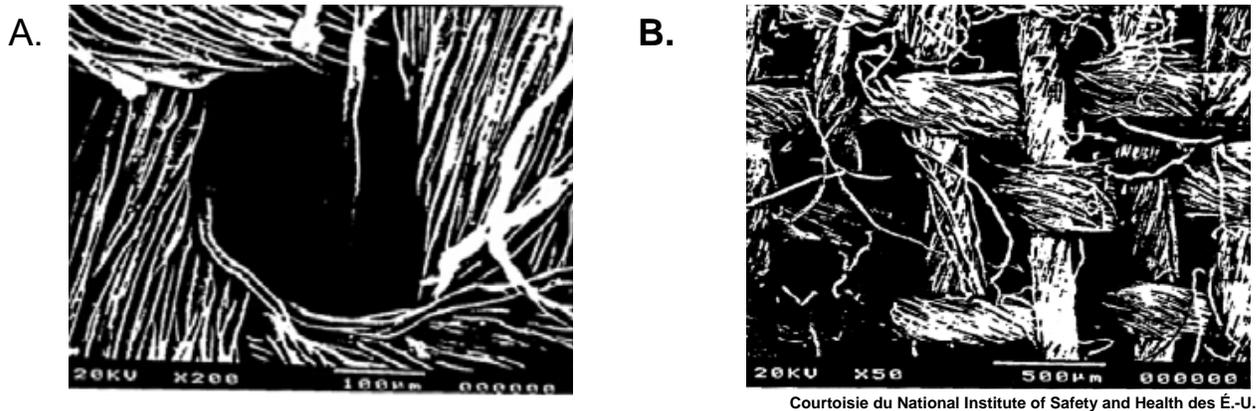
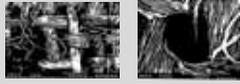


Figure 22. Images au microscope électronique à balayage (MEB) d'un nouveau mouchoir de tête non lavé (A) grossi 200 fois et (B) grossi 50 fois (Reh *et al.*, 1994). La dimension des pores du tissu est d'environ 200 µm x 200 µm, soit de 500 à 2 000 fois plus importante que la taille de la majorité des particules de fumée (0,100-0,400 µm). Gaz, vapeurs et matières particulaires inhalables traverseraient le tissu du mouchoir aussi facilement qu'un moustique une porte ouverte.

Tableau 7. Modèles de respirateurs présentement offerts

Respirateur	Certifié par le NIOSH	FPA ^c	Type		Remarques	
Mouchoir ^{a,b} 	NON	0	Ceci n'est pas un respirateur		Les mouchoirs n'offrent aucune protection contre les particules inhalables, les gaz ou les vapeurs.	
Jetable  © 3M	oui	10	ARF ^d	Ajustement serré	Test d'ajustement requis.	N'offre aucune protection contre les gaz ou les vapeurs (particules inhalables seulement).
Demi-masque  © MSA	oui	10	ARF	Ajustement serré	Test d'ajustement requis.	Poils faciaux interdits.
Masque complet  © MSA		50	ARFAP			offertes ^f .
Casque  © 3M	oui	25	ARFAP	Ajustement lâche	Aucun test d'ajustement requis.	Poils faciaux permis. Verres permis.
		Cagoule  © 3M	1000			

Aucun de ces respirateurs ne protège de l'empoisonnement au monoxyde de carbone (CO).

^aLes pores sont de 500 à 2 000 fois plus grands que la majorité des particules de fumée (0,1-0,4 µm).

^bVoir (Reh *et al.*, 1994).

^cFacteur de protection assigné.

^dAppareil respiratoire filtrant (à pression négative).

^eAppareil respiratoire filtrant à air propulsé (à pression négative).

^fDiverses cartouches sont offertes pour filtrer différents contaminants. Plus d'une cartouche peut être fixée au masque.

9. CONCLUSIONS

Des évaluations d'exposition individuelle n'ont pas été effectuées pour toutes les substances toxiques préoccupantes que l'on sait émaner des feux de forêt, des évaluations approfondies de la santé des pompiers forestiers n'ont pas été effectuées, et aucune étude épidémiologique n'a évalué les effets à long terme sur la santé d'une exposition professionnelle à la fumée durant les feux de forêt. La plupart des études d'exposition à ce jour ont été menées à des niveaux de fumée « faible », et seules quelques-unes ont fourni des données à des niveaux de fumée « moyenne ». On ne sait pas trop si les résultats des études d'exposition disponibles sont représentatifs des conditions de travail des pompiers forestiers. On ne sait pas trop non plus si les pics d'exposition rapportés sont réellement représentatifs des conditions de travail des pompiers forestiers.

Néanmoins, les échantillons recueillis ont démontré que, même exposés à des niveaux de fumée « faible » ou « faible à moyenne », certains pompiers forestiers sont parfois exposés de façon excessive à des fumées contenant du monoxyde de carbone, des gaz irritants et des vapeurs hautement toxiques comme l'acroléine, des agents cancérigènes comme le formaldéhyde et le benzène, et des particules inhalables ultrafines ($<1 \mu\text{m}$), et que l'exposition professionnelle à la fumée entraîne une déperdition de la fonction pulmonaire. Les formes et les niveaux d'exposition à la fumée que connaissent les pompiers forestiers sont très variables et dépendent des stratégies et des tactiques employées, des méthodes de travail utilisées, du niveau de menace pour les régions peuplées et les intérêts économiques, ainsi que d'autres facteurs tels que le type de sol et de forêt, le taux d'humidité du combustible, l'intensité du feu et les conditions éoliennes. Des expositions inattendues peuvent aussi survenir lors d'événements imprévisibles.

Les questions en suspens concernant la protection respiratoire des pompiers forestiers comprennent : la qualité et l'exhaustivité des bases de données d'évaluation de l'exposition des pompiers forestiers; les méthodes utilisées pour résumer les données d'exposition; les éventuels effets synergiques entre les substances toxiques contenues dans la fumée; les niveaux d'efforts accrus, les taux de ventilation pulmonaires plus élevés et les quarts de travail prolongés susceptibles d'entraîner des doses internes plus importantes que celles dont on présume au moment d'établir les limites d'exposition professionnelle; la portée toxicologique d'expositions intermittentes à de fortes concentrations; l'exposition aux particules de sol et de cendre déplacées en cours de travail; les difficultés liées à la surveillance de l'exposition et de la santé d'une main-d'œuvre migrante et saisonnière; l'identification des tâches et des situations exigeant ou non le port d'un respirateur; les lacunes inhérentes aux respirateurs actuellement disponibles; la gestion d'un programme de protection respiratoire pour une main-d'œuvre mobile et diversifiée œuvrant dans un environnement rapidement changeant et parfois imprévisible, en région éloignée et pour des périodes de temps prolongées; l'identification des changements aux tactiques, aux méthodes de travail et aux contrôles administratifs qui réduiraient l'exposition à la fumée sans port de respirateur; et les coûts. Les règlements actuels font abstraction du nombre de particules, des particules ultrafines ($<0,1 \mu\text{m}$) et de la spéciation chimique des matières particulaires, soit des facteurs vraisemblablement importants pour la santé des humains. La question la plus importante en ce qui concerne la recherche sur les émissions particulières des feux de forêt tient à la relation entre l'émission, l'exposition aiguë et chronique, et les

effets sur la santé. Or, au fondement même de cette question repose la spéciation chimique des particules de fumée.

La protection respiratoire chez les pompiers forestiers est une question complexe qui fait l'objet de débats passionnés et d'opinions divergentes, et qui donne lieu à la dissémination d'une grande quantité d'informations erronées. Les échantillons recueillis révèlent que les pompiers forestiers sont exposés à un mélange complexe de produits de combustion, inclusion faite du monoxyde de carbone, de vapeurs et de gaz irritants, d'agents cancérigènes et de particules inhalables ultrafines. Bien qu'on ait interprété certaines études comme révélant que les niveaux d'exposition, échelonnés sur la semaine de travail d'un pompier ou sur l'ensemble de sa carrière, sont en-deçà des limites d'exposition professionnelles moyennes pondérées sur 8 heures (VEMP), d'autres ont démontré que l'exposition à certains produits de combustion toxiques dépasse de loin les limites d'exposition professionnelle de courte durée (VECD) ou les valeurs plafonds au moins une partie du temps.

Il n'y a pas d'études sur l'exposition des pompiers forestiers au Québec. Si les niveaux d'exposition des pompiers forestiers du Québec sont comparables à ceux qu'ont mesurés les études réalisées aux États-Unis, il est probable qu'ils dépassent les limites d'exposition professionnelle de courte durée au moins une partie du temps. Cependant, compte tenu des nombreuses différences relatives aux conditions de travail, surtout en qui a trait aux tactiques, à moins de mener des études sur le terrain, il reste impossible de prédire les niveaux d'exposition de pompiers forestiers travaillant dans différentes compétences géographiques.

Les pompiers forestiers travaillant au Québec sont exposés à la fumée, et donc à des particules inhalables ultrafines ($<1 \mu\text{m}$), à des acides et à des vapeurs organiques, à l'acroléine, au formaldéhyde et au monoxyde de carbone. Aucune étude sur le terrain n'a mesuré les niveaux d'exposition à ces substances au Québec. Bien que certaines études d'exposition aient été menées dans d'autres compétences, il est difficile d'en généraliser les résultats dans le contexte québécois, dans la mesure où la forêt, les sols et plus particulièrement les tactiques et les méthodes utilisées pour combattre les feux de forêt ne sont pas les mêmes au Québec qu'ailleurs. Des observations sur le terrain et des discussions avec des représentants du Service des forêts des États-Unis et de la SOPFEU suggèrent que les pompiers forestiers du Québec sont, en général, moins exposés à la fumée que leurs homologues américains. Il semble toutefois qu'ils soient aussi à l'occasion exposés à des niveaux de fumée comparables à ceux qu'on mesurés les études sur les pompiers forestiers des États-Unis. Il est donc probable que les pompiers forestiers du Québec soient exposés à des composants de la fumée à des niveaux qui dépassent les limites d'exposition professionnelle.

10. RECOMMANDATIONS EN MATIÈRE DE PROTECTION RESPIRATOIRE

La protection des pompiers forestiers contre l'exposition à la fumée devrait principalement reposer sur des contrôles de gestion, des contrôles techniques et des modifications aux méthodes de travail. L'utilisation de respirateurs devrait être considérée comme une mesure de protection secondaire. Si les contrôles administratifs et d'autres méthodes primaires ne suffisent pas à réduire les expositions à des niveaux acceptables, on devrait fournir aux pompiers forestiers du Québec un respirateur certifié par le NIOSH à utiliser en cas d'exposition excessive à la fumée. En pareil cas, il est recommandé d'utiliser un appareil respiratoire filtrant (ARF) ou un appareil respiratoire filtrant à air propulsé (ARFAP) certifié pour se protéger contre les particules inhalables, les acides et les vapeurs organiques, l'acroléine, le formaldéhyde et les HAP. Cependant, étant donné qu'aucun des appareils respiratoires filtrants présentement sur le marché ne protège efficacement contre le monoxyde de carbone, les pompiers qui utilisent de tels appareils pourraient s'exposer sans le savoir à de plus hauts niveaux de monoxyde de carbone qu'ils ne le feraient sans ces appareils. Le monoxyde de carbone est un gaz hautement toxique, incolore, insipide et inodore. D'ici à ce qu'on développe pour les pompiers forestiers un respirateur qui filtre efficacement le monoxyde de carbone (CO), des appareils respiratoires filtrants certifiés devraient toujours être utilisés en conjonction avec un détecteur de monoxyde de carbone réglé pour produire une alarme sonore vibrante lorsque la limite d'exposition professionnelle au CO est dépassée. Les pompiers forestiers qui portent des appareils respiratoires filtrants n'offrant aucune protection contre le CO devraient se retirer des zones où les niveaux de CO dépassent la limite d'exposition professionnelle. Les pompiers forestiers ne devraient pas utiliser des masques ou des appareils buccaux non certifiés en guise de mesure de protection respiratoire contre la fumée.

Des détecteurs de CO devraient aussi être utilisés par les pompiers forestiers qui travaillent sans respirateur dans des zones enfumées. Puisque les niveaux de CO ont un rapport avec les niveaux d'autres composants toxiques de la fumée, le point de réglage devrait être déterminé en fonction d'une concentration de CO à laquelle on s'attend que les niveaux de CO, de formaldéhyde, d'acroléine, de HAP, de matières particulaires inhalables et de l'ensemble des matières particulaires soient tous inférieurs à leur limite d'exposition professionnelle respective, et à laquelle on s'attend à ce que l'indice d'irritation soit <1,0. D'autres recherches sont requises pour déterminer ce que ce point de réglage devrait être et les procédures à suivre en cas d'alarme.

À ce stade, il y a trop de facteurs inconnus pour faire une recommandation définitive concernant le type de respirateur que devraient utiliser les pompiers forestiers. Un ARF de type demi-masque à pression négative offre un facteur de protection (APF) de 10, alors qu'un masque complet offre un APF de 50 et protège aussi les yeux. La protection des yeux pourrait être nécessaire puisqu'on a constaté que les pompiers forestiers étaient parfois surexposés à des irritants, notamment le formaldéhyde. Tous les types d'ARF réduisent la capacité de travail des pompiers forestiers. Les appareils respiratoires filtrants à air propulsé (ARFAP) sont des appareils à pression positive qui offrent des facteurs de protection accrus (APF de 50 pour le demi-masque, et de 1 000 pour le masque complet) et une résistance respiratoire réduite, ce qui est particulièrement important à des niveaux d'effort élevés. Au moment de choisir un ARFAP parmi les modèles offerts sur le marché,

il convient de prendre en compte le poids, le bruit, la robustesse et la durée de vie de la pile.

L'utilisation d'ARF ou d'ARFAP de type demi-masque ou masque complet exige la mise en œuvre d'un programme officiel de protection respiratoire, incluant des essais d'ajustement et l'interdiction du port de la barbe. L'utilisation d'un ARFAP de type casque à écran facial (respirateur à ajustement lâche) offrirait un APF de 25. Les principaux avantages de ce genre d'appareil sont le confort, le fait qu'il ne requiert pas d'ajustement et la possibilité de porter la barbe. Certains modèles à cagoule se sont avérés offrir un APF pouvant aller jusqu'à 1 000.

Quel que soit le type de protection respiratoire utilisé, les pompiers forestiers doivent être prévenus qu'aucun des respirateurs actuellement offerts sur le marché n'offre une protection contre tous les composants toxiques de la fumée. Ils doivent aussi être informés de ce que, compte tenu de la complexité du mélange des composants de la fumée et des niveaux d'effort caractéristiques de la lutte contre les feux de forêt, l'efficacité et la durée de vie des cartouches purifiantes restent inconnues. Enfin, les ARF et les ARFAP ne peuvent être utilisés en situation de DIVS. En pareil cas (p. ex., en milieu périurbain où les pompiers peuvent être exposés à des situations de DIVS dans des bâtiments en flammes), un appareil respiratoire autonome (ARA) serait requis.

11. FUTURES RECHERCHES

Les gestionnaires responsables des pompiers forestiers du Québec doivent prendre des mesures pour s'assurer que les niveaux d'exposition ne dépassent pas les limites d'exposition professionnelle ayant force obligatoire en vertu de la loi en ce qui concerne les substances les plus préoccupantes (monoxyde de carbone, matières particulaires inhalables et ensemble des matières particulaires, formaldéhyde, acroléine, benzo[a]pyrène, benzène, 2-furaldéhyde et gaz acides). Il s'agit là d'une tâche impossible sans une meilleure compréhension des expositions réelles que connaissent les pompiers forestiers et de leur variabilité. Il serait tout aussi peu intelligent d'investir lourdement dans la protection respiratoire là où elle n'est pas nécessaire que de ne pas l'offrir là où elle l'est. De manière à pouvoir gérer les expositions à la fumée des pompiers forestiers, que ce soit par des contrôles administratifs ou par le recours à la protection respiratoire, il est fortement recommandé d'effectuer une étude approfondie de l'exposition individuelle en fonction de la tâche auprès des pompiers forestiers du Québec.

Étant donné que la majorité des échantillonnages décrits dans la littérature ont été faits au cours des phases avancées de feux de forêt, lorsque les niveaux d'exposition sont tenus pour relativement faibles, il importe que l'étude québécoise soit organisée de manière à assurer une mobilité et une réactivité rapide à même de permettre un échantillonnage représentatif durant les différentes phases auxquelles sont confrontés les pompiers forestiers, y compris l'attaque initiale. Il importe également de faire en sorte que l'échantillonnage ne soit pas limité à la mesure de valeurs moyennes pondérées sur la durée d'un quart de travail, mais s'étende plutôt aux niveaux des pics d'exposition et des moyennes pondérées sur 15 minutes. La variabilité des expositions doit être établie à l'aide d'enregistreurs de données.

Une caractérisation chimique des particules de fumée doit aussi être effectuée. En plus d'évaluer l'exposition des pompiers forestiers aux substances les plus préoccupantes, il est recommandé de déterminer la corrélation entre ces substances afin d'identifier une mesure de substitution fiable de la fumée (p. ex., monoxyde de carbone). Les conditions d'exposition doivent être clairement documentées durant toutes les phases d'échantillonnage afin de distinguer les tâches, d'identifier les conditions météorologiques et d'incendie, d'identifier les sols et les combustibles, y compris le taux d'humidité des combustibles, et de distinguer l'exposition à la fumée d'autres sources de contamination, telles qu'échappement des véhicules, échappement des aéronefs, échappement du matériel, vapeurs de gazoline, etc. Puisque les pompiers forestiers sont aussi exposés à la poussière et à la cendre qu'ils déplacent en parcourant des brûlis où il n'y a que peu de fumée, les expositions à l'ensemble des particules et aux particules inhalables de même qu'aux silices cristallines devraient aussi être évaluées dans ces conditions, inclusion faite de la caractérisation chimique des matières particulaires.

L'échantillonnage individuel serait effectué en relation avec l'estimation visuelle de l'intensité de la fumée, documentée à l'aide de photographies. Il s'avère donc nécessaire de procéder à une étude préliminaire sur le terrain en présence de pompiers forestiers d'expérience afin d'élaborer une échelle bien définie et documentée à l'aide de photos en

ce qui concerne l'estimation visuelle de l'intensité et de la qualité de la fumée (p. ex., faible, moyenne, élevée, très élevée).

Il est recommandé de réaliser une étude de surveillance médicale (p. ex., tests de fonctions pulmonaires d'un quart à l'autre et d'une saison à l'autre, prévalence des symptômes respiratoires et neurologiques) conjointement aux mesures d'exposition. Au moment d'évaluer des symptômes tels que des maux de tête, il faudrait songer à la possibilité d'une exposition au monoxyde de carbone, d'une alimentation déficiente et d'un stress thermique. L'étude devrait aussi inclure une évaluation physiologique des niveaux d'effort et de dépense en énergie des pompiers forestiers. Il est recommandé d'effectuer une étude de rendement des respirateurs en contexte d'incendie de forêt.

La conception d'une étude épidémiologique visant à déterminer les effets sur la santé de la lutte contre les feux de forêt présenterait de nombreux défis : travailleurs saisonniers, expositions intermittentes et variables, tâches variées et variables, facteurs confusionnels et taille de la population. Il est recommandé de consulter un épidémiologiste pour déterminer la faisabilité d'une telle étude.

Le besoin d'un plus grand nombre de données n'implique en rien qu'il ne faut pas agir dès maintenant sur la base des données existantes. Les études d'exposition réalisées à ce jour révèlent clairement qu'au moins certains pompiers forestiers sont exposés à des composants de la fumée à des niveaux qui dépassent les limites réglementaires. Il n'est pas nécessaire – il serait en fait inapproprié – d'attendre que toutes les études possibles soient effectuées avant de réduire les expositions à des niveaux acceptables, que ce soit par des contrôles administratifs ou par le recours à la protection respiratoire.

BIBLIOGRAPHIE

- ACGIH, 2007a. Documentation of the Threshold Limit Values and Biological Exposure Indices. American Conference of Government Industrial Hygienists, Cincinnati OH.
- ACGIH, 2007b. TLVs & BEIs: Threshold Limit Values for chemical substances and physical agents & Biological Exposure Indices. American Conference of Government Industrial Hygienists, Cincinnati OH.
- Achtemeier G.L., 2003. On the origins of “Superfog”: A combination of smoke and water vapor that produces zero visibility over roadways. 2nd International Wildland Fire Ecology and Fire Management Congress Orlando, Florida, November 16-20.
- AFS, 1997. Trainee workbook - Basic firefighter safety course. Alberta Forest Service, Provincial Forest Fire Centre, Environmental Training Centre.
- AFS, 1999. Wildland firefighter unit member - Type III. Alberta Forest Service, Provincial Forest Fire Centre, Environmental Training Centre.
- AIHA, 1989. Odor thresholds for chemicals with established occupational health standards. American Industrial Hygiene Association, Fairfax, Virginia.
- Aldrich D., 1995. Career duration estimates for wildland firefighters. Personal communication.
- Amoore J.E. and Hautala E., 1983. Odor as an aid to chemical safety: Odor thresholds compared with Threshold Limit Values and volatilities for 214 industrial chemicals in air and water dilution. *Journal of Applied Toxicology*, 3: 272-290.
- Andreae M.O. and Merlet P., 2001. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. *Global Biogeochem Cycles*, 15 (4): 955-966.
- Anthony T.R., Joggerst P., James L., Burgess J.L., Leonard S.S. and Shogren E.S., 2007. Method development study for APR cartridge evaluation in fire overhaul exposures. *Annals of Occupational Hygiene*, 51 (8): 703-716.
- Aronson K.J., Tomlinson G.A. and Smith L., 1994. Mortality among fire fighters in metropolitan Toronto. *American Journal of Industrial Medicine*, 26 (1): 89-101.
- ATSDR, 1999. Toxicological profile for formaldehyde. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Public Health Service, U.S. Department of Health and Human Services.
- ATSDR, 2000. Toxicological profile for acrolein. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Public Health Service, U.S. Department of Health and Human Services.
- ATSDR, 2007. Toxicological profile for benzene. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Public Health Service, U.S. Department of Health and Human Services.
- Austin C.C., 1997. Municipal firefighter exposures to toxic gases and vapours. Faculty of Medicine, Department of Epidemiology, Biostatistics and Occupational Health. Montreal, McGill University, Montreal, Quebec. PhD Thesis: 311 pages.
- Austin C.C., 2001a. Accurate solution of the Coburn-Forster-Kane (CFK) equation using an iterative algorithm programmed into Excel spreadsheet software. American Industrial Hygiene Association Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana.
- Austin C.C., 2001b. Complex mixtures of VOCs in air: Marker compounds, principal component analysis, pattern recognition and modelling in occupational exposure and health. Canadian Association for Research on Work and Health - 1st National Symposium, Toronto ON.

- Austin C.C., Dussault G. and Ecobichon D.J., 2001a. Municipal firefighter exposure groups, time spent at fires and use of self-contained-breathing-apparatus (SCBAs). *American Journal of Industrial Medicine*, 40: 683-692.
- Austin C.C., Wang D., Ecobichon D.J. and Dussault G., 2001b. Characterization of volatile organic compounds in smoke at municipal structural fires. *Journal of Toxicology & Environmental Health Part A*, 63 (6): 437-458.
- Austin C.C., Wang D., Ecobichon D.J. and Dussault G., 2001c. Characterization of volatile organic compounds in smoke at experimental fires. *Journal of Toxicology & Environmental Health Part A*, 63 (3): 191-206.
- Austin C.C., 2002. Firefighter exposure groups, cumulative benzene exposures and predicted leukemic risk. World Congress of Epidemiology, International Epidemiological Association, Montreal, Quebec, August 18-22.
- Austin C.C. and Wang D., 2002. VOC chemical fingerprinting: Combustion sources and environmental monitoring. EnviroAnalysis: The 4th Biennial International Conference on Chemical Measurement and Monitoring of the Environment, Toronto, Ontario, Canada, May 27-30.
- Austin C.C., 2005. Photographs taken at a large forest fire in northern Quebec. Unpublished work.
- Austin C.C. and Goyer N., 2007. Respiratory protection for wildland firefighters: Much ado about nothing or time to revisit accepted thinking. Wildfire 2007, International Wildland Fire Conference, Sevilla, Spain, May 13-18.
- Ayres S.M., Mueller H.S., Gregory J.J., Giannelli S.J. and Penny J.L., 1969. Systemic and myocardial hemodynamic responses to relatively small concentrations of carboxyhemoglobin (COHb). *Archives of Environmental Health*, 18: 699-709.
- Barney R.J. and Berglund E.R., 1974. Wildfire smoke conditions: Interior Alaska. U.S. Department of Agriculture Forest Service, Pacific Northwest Forest and Range Experimental Station, Portland, Oregon.
- Barregard L., Sallsten G., Gustafson P., Andersson L., Johansson L., Basu S. and Stigendal L., 2006. Experimental exposure to woodsmoke particles in health humans: Effects on markers of inflammation, coagulation, and lipid peroxidation. *Inhalation Toxicology*, 18 (11): 845-853.
- Bates M.N., 2007. Registry-based case-control study of cancer in California firefighters. *American Journal of Industrial Medicine*, 50: 339-344.
- Beaumont J.J., Chu G.S., Jones J.R., Schenker M.B., Singleton J.A., Piantanida L.G. and Reiterman M., 1991. An epidemiologic study of cancer and other causes of mortality in San Francisco firefighters. *American Journal of Industrial Medicine*, 19 (3): 357-372.
- Betchley C., Koenig J.Q., Vanbelle G., Checkoway H. and Reinhardt T., 1997. Pulmonary function and respiratory symptoms in forest firefighters. *American Journal of Industrial Medicine*, 31 (5): 503-509.
- Bollinger N.J. and Schutz R.H., 1987. NIOSH Guide to industrial respiratory protection. National Institute for Occupational Safety and Health,
- Boord L., 2007. Comment letter to NFPA Standards Council: Wildland firefighter respiratory protection. National Institute for Occupational Health and Safety (NIOSH),
- Booze T.F., Reinhardt T.E., Quiring S.J. and Ottmar R.D., 2004. A screening-level assessment of the health risks of chronic smoke exposure for wildland firefighters. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 1: 296-305.

- Brodeur J., Vyskocil A., Tardif R., Perrault G., Drolet D., Truchon G. and Lemay F., 2001. Adjustment of permissible exposure values to unusual work schedules. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 62: 584-594.
- Budd G., Brotherhood J., Hendrie L., Cheney P. and Dawson M., 1996. Safe and protective brushfire fighting with hand tools. Australian Government Publishing Service.
- Budd G.M., Brotherhood J.R. and Hendrie L., 1997. Project Aquarius 5: Activity distribution, energy expenditure, and productivity of men suppressing free-running wildland fires with hand tools. *International Journal of Wildlandfire*, 7: 105-118.
- Burgess J.L., Witten M.L., Nanson C.J., Hysong T.A., Sherrill D.L., Quan S.F., Gerkin R. and Bernard A.M., 2003. Serum pneumoproteins: a cross-sectional comparison of firefighters and police. *American Journal of Industrial Medicine*, 44 (3): 246-253.
- CDHS, 1990. Respiratory effects of smoke exposure in wildland firefighters: I. Methacholine challenge testing and exposure monitoring. California Department of Health Services, Occupational Health Program, Berkely, California.
- Chen L., Verrall K. and Tong S., 2006. Air particulate pollution due to bushfires and respiratory hospital admissions in Brisbane, Australia. *International Journal of Environmental Health Research*, 16 (3): 181-191.
- Cooper C.W., Mira M., Danforth M., Abraham K., Fasher B. and Bolton P., 1994. Acute exacerbations of asthma and bushfires. *Lancet*, 343 (8911): 1509.
- Costa D.L., 2001. Air pollution. IN: Casarett & Doull's toxicology: The basic science of poisons. Ed.: Klaassen C.D. McGraw-Hill Inc.,
- Darley E.F., Middleton J.T. and Garber M.J., 1960. Plant damage and eye irritation from ozone-hydrocarbon reactions. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 8: 483-485.
- De Vos A.J.B.M., Cook A., Devine B., Thompson P.J. and Weinstein P., 2006. Effect of protective filters on fire fighter respiratory health during simulated bushfire smoke exposure. *American Journal of Industrial Medicine*, 49: 740-750.
- Decoufle P., 1977. A retrospective survey of cancer in relation to occupation. National Institute for Occupational Safety (NIOSH), Cincinnati, OH.
- Delmas R., Lacaux J.P. and Brocard D., 1995. Determination of biomass burning emission factors: Methods and results. *Environmental Monitoring and Assessment*, 38 (2-3): 181-204.
- Demers P.A., Heyer N.J. and Rosenstock L., 1992. Mortality among firefighters from three northwestern United States cities. *British Journal of Industrial Medicine*, 49 (9): 664-670.
- Demers P.A., Checkoway H., Vaughan T.L., Weiss N.S., Heyer N.J. and Rosenstock L., 1994. Cancer incidence among firefighters in Seattle and Tacoma. *Cancer Causes and Control*, 5 (2): 129-135.
- Dennis A., Fraser M., Anderson S. and Allen D., 2002. Air pollutant emissions associated with forest, grassland, and agricultural burning in Texas. *Atmospheric Environment*, 36 (23): 3779-3792.
- Dost F.N., 1991. Acute toxicology of components of vegetation smoke. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 119: 1-46.
- Driessen J., Sharkey B. and Buskirk D., 1992. The use of respiratory protective devices by wildland firefighters. Health hazards of smoke. U.S. Department of Agriculture Forest Service, Missoula, Montana.

- Drolet D., 2008. Guide for the adjustment of permissible exposure values (PEVs) for unusual work schedules, 3rd edition revised and updated. (Technical Report T-22). The Robert-Sauvé Institute for Research in Occupational Health and Safety of Quebec (Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST)), Montreal.
- Drouin S., 2006. Wildland firefighting statistics. Personal communication.
- Duclos P., Sanderson L.M. and Lipsett M., 1990. The 1987 forest fire disaster in California: assessment of emergency room visits. *Archives of Environmental Health*, 45 (1): 53-58.
- Duffin J., Mohan R.M., Vasilou P., Stephenson R. and Mahamed S., 2000. A model of the chemoreflex control of breathing in humans. *Respiratory Physiology*, 120 (1): 13-26.
- Eastman Kodak Company, 1963. Personal observations. IN: Industrial Hygiene and Toxicology. Ed.: Patty F.A. Interscience Publishers Inc., New York, NY, Vol II. Toxicology,
- Edwards R., Johnson M., Dunn K.H. and Naeher L.P., 2005. Application of real-time particle sensors to help mitigate exposures of wildland firefighters. *Archives of Environmental and Occupational Health*, 60 (1): 40-43.
- Eglin C.M., 2007. Physiological responses to fire-fighting: Thermal and metabolic considerations. *Journal of the Human-Environmental System*, 10 (1): 7-18.
- Eliopoulos E., 1984. Mortality of firefighter in Western Australia. *British Journal of Industrial Medicine*, 41: 183-187.
- Emmanuel S.C., 2000. Impact to lung health of haze from forest fires: The Singapore experience. *Respirology*, 5 (2): 175-182.
- EPA, 1997. An update to exposure factors handbook. Environmental Protection Agency, Washington DC.
- EPA, 2001. Supplemental guidance for developing soil screening levels for Superfund sites. Environmental Protection Agency, Washington DC.
- Ferlay V. and Picard C., 1997. Identification et quantification des composés présents dans les fumées de feux de forêts. *Prévention-Sécurité*, 33: 73-81.
- FESA, 2003. Bush fire smoke management. Fire and Emergency Services Authority, Western Australia.
- Fick R.B., Jr., Paul E.S., Merrill W.W., Reynolds H., Y. and Loke J., S., 1984. Alterations in the antibacterial properties of rabbit pulmonary macrophages exposed to wood smoke. *American Review of Respiratory Disease*, 129 (1): 76-81.
- Gaughan D.M., Cox-Ganser J.M., Enright P.L., Jensen K.R., Wagner G.R., Radtke T.M. and Kreiss K., 2005. Acute respiratory effects of smoke exposure in wildland firefighters. Annual Meeting of the American Thoracic Society, National Institute of Occupational Safety and Health (NIOSH).
- Ghio A.J., Castellan R.M., Kinsley K.B. and Hankinson J.L., 1991. Changes in forced expiratory volume in one second and peak expiratory flow rate across a work shift among unexposed blue collar workers. *American Review of Respiratory Disease*, 143: 1231-1234.
- Grimes G., Hirsh D. and Borgeson D., 1991. Risk of death among Honolulu firefighters. *Hawaii Medical Journal*, 50 (3): 82-85.
- Guidotti T.L., 1992. Human factors in firefighting: Ergonomic, cardiopulmonary, and psychogenic stress related issues. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 64 (1): 1-12.
- Guidotti T.L. and Clough V.M., 1992. Occupational health concerns of firefighting. *Annual Review of Public Health*, 13: 151-171.

- Guidotti T.L., 1993. Mortality of urban firefighters in Alberta, 1927-1987. *American Journal of Industrial Medicine*, 23 (6): 921-940.
- Guidotti T.L., 1995. Occupational mortality among firefighters: Assessing the association. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 37 (12): 1348-1356.
- Gullett B.K., Touati A. and Hays M.D., 2003. PCDD/F, PCB, HxCBz, PAH, and PM emission factors for fireplace and woodstove combustion in the San Francisco Bay region. *Environ Sci Technol*, 37 (9): 1758-1765.
- Haas N.S., Gochfeld M., Robson M.G. and Wartenberg D., 2003. Latent health effects in firefighters. *Int J Occup Environ Health*, 9 (2): 95-103.
- Hardy C.C., Conard S.G., Regelbrugge J.C. and Teesdale D.R., 1996. Smoke emissions from prescribed burning of southern California chaparral. U.S. Department of Agriculture Forest Service, Pacific Northwest Research Station.
- Henderson Y. and Haggard H.W., 1943. Noxious Gases, 2nd edition. Reinhold Publishing Corporation, New York, New York.
- Hill C.B., 2000. Structural firefighters use of wildland personal protective clothing and equipment on Florida wildfires: Executive leadership. Florida Division of Forestry, Jacksonville, Florida.
- Holder J.D., Stallings L.A., Peeples L., Burress J.W. and S.N. K., 2006. Firefighter heart presumption retirements in Massachusetts 1997-2004. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 48 (10): 1047-1053.
- Howe G.R. and Burch J.D., 1990. Firefighters at risk of cancer: an assessment and overview of the epidemiological evidence. *American Journal of Epidemiology*, 132: 1039-1050.
- Hoyt R.W., Jones T.E. and Baker-Fulco C.J., 1991. Doubly labeled water measurement of human energy expenditure during strenuous exercise. *Journal of Applied Physiology*, 71: 16-22.
- IAFF, 2007. Fire service joint labor management wellness fitness initiative. International Association of Fire Fighters.
- IARC, 1982. Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Some industrial chemicals and dyestuffs. Volume 29. International Agency for Research on Cancer, Lyon, France.
- IARC, 1985. Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Volume 39. International Agency for Research on Cancer, Lyon, France.
- IARC, 1987. Monographs on the evaluation of carcinogenic risk of chemicals to humans. Overall Evaluations of Carcinogenicity. Supplement 7. International Agency for Research on Cancer, Lyon, France.
- IARC, 1995. Monographs on the evaluation of carcinogenic risk of chemicals to humans. Wood Dust and Formaldehyde. Volume 262. International Agency for Research on Cancer, Lyon, France.
- IARC, 2000. Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Volume 77. International Agency for Research on Cancer, Lyon, France.
- IARC, 2004. Monographs on the evaluation of carcinogenic risk of chemicals to humans. Formaldehyde, 2-butoxyethanol and 1-tert-butoxy-2-propanol. Volume 88. International Agency for Research on Cancer, Lyon, France.
- IARC, 2006. Overall Evaluations of Carcinogenicity to Humans: Group 2A: Probably carcinogenic to humans. International Agency for Research on Cancer, Lyon, France.

- IARC, Straif K., Baan R., Grosse Y., Secretan B., El Ghissassi F., Bouvar V., Altieri A., Benbrahim-Tallaa L., Cogliano V., On Behalf of the IARC Working Group, Arendt J., Austin C.C., Blair A., Blask D., Brock T., Bratveit M., Burgess J.C., Costa G., Davis S., Demers P., Hansen J., Haus E., Huici-Montagud A., Landrigan P.J., Lemasters G.K., Lévi F., Merletti F., Portier C., Pukkala E., Schernhammer E., Steenland K., Stevens R., Vermeulen R., Zheng T. and Zhu Y., (In Press). Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Shiftwork, painting, and firefighting. Volume 98. World Health Organization, International Agency for Research on Cancer, Lyon, France.
- IARC, In Press. Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Volume 95. International Agency for Research on Cancer, Lyon, France.
- IDSP, 1994. Report to the workers' compensation board on cardiovascular disease and cancer among firefighter. Industrial Disease Standards Panel, Toronto ON.
- Ignacio J.S. and Bullock W.H., Eds, 2006. A Strategy for Assessing and Managing Occupational Exposures, 3rd Edition. AIHA, Fairfax VA.
- IRSST, 2004. Guide de surveillance biologique: Prélèvements et interprétation des résultats. 6^e édition. (Guide technique T-03). Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et sécurité du travail, Montréal, Québec.
- ISO, 2002. Wildland firefighting personal protective equipment: Requirements and test methods. International Standards Organization, Geneva, Switzerland.
- ISO, 2005. Life-threatening components of fire: Guidelines for the estimation of time available for escape using fire data. Technical Committee 92, Subcommittee 3 (TC92/SC 3). International Standards Organization, Geneva, Switzerland.
- ISO, 2006. Wildland fire environment paper. Prepared by ISO/TC94/SC14/WG3/PG3 for support in development of ISO 16073. International Standards Organization, Geneva, Switzerland.
- Johnson A.T., Koh F.C., Jamshidi S. and Rehak T.E., 2008. Human subject testing of leakage in a loose-fitting PAPR. *Journal of Occupational & Environmental Hygiene*, 5 (5): 325-329.
- Johnson F.H., Kavanagh A.M., Bowman D.M. and Scott R.S., 2002. Exposure to bushfire smoke and asthma: An ecological study. *Medical Journal of Australia*, 176: 535-538.
- Kales S.N., Soteriades E.S., Christophi C.A. and Christiani D.C., 2007. Emergency duties and deaths from heart disease among firefighters in the United States. *The New England Journal of Medicine*, 356 (12): 1207-1215.
- Kelly J.E., 1992a. Health hazard evaluation report: U.S. Department of the Interior, National Park Service, New River Gorge National River, West Virginia. National Institute for Occupational Health and Safety (NIOSH).
- Kelly J.E., 1992b. Health hazard evaluation report: U.S. department of the Interior, National Park Service, Gallatin National Forest, Montana. National Institute for Occupational Health and Safety (NIOSH).
- Kizakevich P.N., McCartney M.L., Hazucha M.J., Sleet L.H., Jochem W.J., Hackney A.C. and Bolick K., 2000. Noninvasive ambulatory assessment of cardiac function in healthy men exposed to carbon monoxide during upper and lower body exercise. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 83 (1): 7-16.
- Lara J. and Vennes M., 1998. Guide - Respirateurs utilisés au Québec. IRSST - Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et sécurité du travail, Montreal, Quebec.
- Lara J., 2002. Guide pratique de protection respiratoire. IRSST - Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et sécurité du travail, Montreal, Quebec.

- Lemasters G.K., Genaidy A.M., Succop P., Deddens J., Sobeih T., Barriera-Viruet H., Dunning K. and Lockey J.E., 2006. Cancer risk among firefighters: A review and meta-analysis of 32 studies. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 48 (11): 1189-1202.
- Lemieux P.M. and Ryan J.V., 1993. Characterization of air pollutants emitted from a simulated scrap tire fire. *Air & Waste Management Association Journal*, 43 (8): 1106-1115.
- Lemieux P.M., Lutes C.C. and Santoianni D.A., 2004. Emissions of organic air toxics from open burning: A comprehensive review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30 (1): 1-32.
- Leonard S.S., Castranova V., Chen B.T., Schwegler-Berry D., Hoover M., Piacitelli C. and Gaughan D.M., 2007. Particle size-dependent radical generation from wildland fire smoke. *Toxicology*, 236 (1-2): 103-113.
- Letts D., Fidler A.T., Deitchman S. and Reh C.M., 1991. Health hazard evaluation report: U.S. Department of the Interior, National Park Service, Southern California National Institute of Occupational Health and Safety.
- Levin B.C., 1996. New research avenues in toxicology: 7-gas N-gas model, toxicant suppressants, and genetic toxicology. *Toxicology*, 115 (1-3): 89-106.
- Levin B.C., 1997. New approaches to toxicity: a seven-gas predictive model and toxicant suppressants. *Drug and Chemical Toxicology*, 20 (4): 271-280.
- Liang C.K., Quan N.Y., Cao S.R., He X.Z. and Ma F.C., 1988. Natural inhalation exposure to coal smoke and wood smoke induces lung cancer in mice and rats. *Biomedical and Environmental Science*, 1 (1): 42-50.
- Liu D., Tager I.B., Balmes J.R. and Harrison R.J., 1992. The effect of smoke inhalation on lung function and airway responsiveness in wildland fire fighters. *American Review of Respiratory Disease*, 146 (6): 1469-1473.
- Materna B.L., Jones J.R., Sutton P.M., Rothman N. and Harrison R.J., 1992. Occupational exposures in California wildland firefighting. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 53: 69-76.
- Materna B.L. and Koshland C.P., 1993. Carbon monoxide exposure in wildland firefighting: A comparison of monitoring methods. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 8 (5): 479-487.
- McCammon J.B. and McKenzie L., 2000. Wildland firefighter-managed carbon monoxide (CO) exposure monitoring. (HETA 98-0173-2782). U.S. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), Colorado.
- McGregor D.B., 2005a. Risk of urinary bladder tumours in firemen. Studies and Research Reports, R-401. Institut de Robert-Sauvé en santé et sécurité du travail (IRSST), Montreal, Quebec.
- McGregor D.B., 2005b. Risk of kidney tumours in firemen. Studies and Research Reports, R-399. Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et sécurité du travail (IRSST), Montreal, Quebec.
- McGregor D.B., 2005c. Risk of brain tumours in firemen. Studies and Research Reports, R-397. Institut de Robert-Sauvé de recherche en santé et sécurité du travail, Montreal, Quebec.
- Milham S., 1983. Occupational mortality in Washington state, 1950-1979. National Institute of Occupational Safety and Health (NIOSH).
- Miranda A.I., Ferreira J., Valente J., Santos P., Amorim J.H. and Borrego C., 2005. Smoke measurements during Gestosa-2002 experimental field fires. *International Journal Of Wildland Fire*, 14: 107-116.

- Morrow P.E., Muhle H. and Mermelstein R., 1991. Chronic inhalation study findings as a basis for proposing a new occupational dust exposure limit. *Journal of the American College of Toxicology*, 10 (2): 279-290.
- Morrow P.E., 1992. Dust overloading of the lungs: Update and appraisal. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 113: 1-12.
- MTDC, 1991. Health hazards of smoke. U.S. Department of Agriculture Forest Service, Missoula Technology & Development Center, Missoula, Montana.
- MTDC, 1999a. Wildland fire fatalities in the United States. Technology and Development Program, (9951-2808-MTDC). United States Department of Agriculture Forest Service, Missoula Technology & Development Center, Missoula, MT.
- MTDC, 1999b. Wildland firefighter health and safety: Recommendations of the April 1999 conference. (9951-2841-MTDC). United States Department of Agriculture Forest Service, Missoula Technology & Development Center, Missoula, Montana.
- Mulhausen J.R. and Damiano J., 1998. A strategy for assessing and managing occupational exposures. American Industrial Hygiene Association Exposure Assessment Strategies Committee, Fairfax VA.
- Naeher L.P., 2006. Health impacts of exposure to wildfire smoke in the United States. Georgia Air Quality and Climate Summit, Atlanta, Georgia, May 4-5.
- Naeher L.P., Dunn K.H. and Stock A.L., 2006. 55-day PM_{2.5} and CO exposure assessment during prescribed burn operations at the Department of Energy Savannah River Site near Aiken SC. Unpublished work.
- Naeher L.P., Brauer M., Lipsett M., Zelikoff J.T., Simpson C.D., Koenig J.Q. and Smith K.R., 2007. Woodsmoke health effects: A review. *Inhalation Toxicology*, 19 (1): 67-106.
- Neitzel R., Naeher L.P., Paulsen M., Dunn K., Stock A. and Simpson C.D., 2008. Biological monitoring of smoke exposure among wildland firefighters: A pilot study comparing urinary methoxyphenols with personal exposures to carbon monoxide, particular matter, and levoglucosan. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, Advance online publication.
- NFPA, 1995. Standard for wildland fire apparatus (NFPA 1906). National Fire Protection Association, Quincy MA.
- NFPA, 2000. Standard on health-related fitness programs for fire fighters (NFPA 1583). National Fire Protection Association, Quincy MA.
- NFPA, 2007a. Agenda and Minutes from the March 13-17, 2007, Miami, Florida meeting. National Fire Protection Association Standards Council, Quincy MA.
- NFPA, 2007b. Standard on comprehensive occupational medical program for fire departments (NFPA 1582). National Fire Protection Association, Quincy MA.
- NFPA, 2007c. Standard for Wildland Fire Fighter Professional Qualifications (NFPA 1051). National Fire Protection Association, Quincy MA.
- NFPA, 2007d. [Letter to Chris Anaya, California]. Action taken re new respiratory standard for wildland firefighting. National Fire Protection Association Standards Council, Quincy MA.
- NIFC, 2003. Wildland fire accidents by year. U.S. National Interagency Fire Center.
- NIOSH, 1991. Hazard evaluation and technical assistance report: U.S. Department of the Interior, National Park Service, Southern California. National Institute for Occupational Safety and Health, Cincinnati OH.

- NIOSH, 1995. Documentation for Immediately Dangerous to Life and Health concentrations (IDLHs). National Institute for Occupational Safety and Health, Cincinnati, OH.
- NIOSH, 2004a. Documentation for Immediately Dangerous to Life and Health concentrations (IDLHs). National Institute for Occupational Safety and Health, Cincinnati OH.
- NIOSH, 2004b. Certified Equipment List. National Institute for Occupational Safety and Health, Cincinnati OH.
- NIOSH, 2005a. Wildland firefighter symposium. National Institute for Occupational Safety and Health. Unpublished work, Morgantown, West Virginia.
- NIOSH, 2005b. Pocket guide to chemical hazards. National Institute for Occupational Safety and Health, Cincinnati OH.
- NRC, 1981. Formaldehyde and other aldehydes. National Academy Press, National Research Council, Washington DC.
- NTP, 2005. Report on carcinogens, 11th edition. U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, National Toxicology Program.
- NWCG, 1990. Fire fighter safety in the wildland-urban interface. National Wildfire Coordinating Group, Boise ID.
- NWCG, 1997. Health hazards of smoke: Recommendations of the April 1997 Consensus Conference. National Wildfire Coordinating Group and U.S. Department of Agriculture Forest Service, Missoula Technology & Development Center, Missoula, Montana.
- Oberdörster G., 2004. Translocation of Inhaled Ultrafine Particles to the Brain. *Inhalation Toxicology*, 16: 437-445.
- ONGC, 1997a. Recommandations visant la fourniture et l'utilisation des vêtements de travail portés par les sapeurs-pompiers forestiers à la ligne de feu - CAN/CGSB-155.23-97. Office des normes générales du Canada.
- ONGC, 1997b. Vêtements de travail portés par les sapeurs-pompiers forestiers à la ligne de feu (CAN/CGCB-155.22-97). Office des normes générales du Canada.
- ONGC, 1998. Certification listing program for fireline workwear for forest firefighters. Office des normes générales du Canada.
- OSHA, 2003. Permissible exposure limites (PELs). U.S. Occupational Safety and Health Administration.
- Parlour L., 2007. Use of particulate/formaldehyde air purifying half-face respirators by career firefighters. Personal communication.
- Poulin S., 2007. Personal communication.
- Province of Quebec, 2007. Regulation respecting occupational health and safety. c. S-2.1, r.19.01. Government of Quebec, Quebec, Canada.
- Pryor W.A., 1992. Biological effects of cigarette smoke, wood smoke, and the smoke from plastics: the use of electron spin resonance. *Free radical biology and medicine*, 13 (6): 659-676.
- Purser D.A., 2002. Toxicity assessment of combustion products. IN: Fire Protection Engineering. National Fire Protection Association (NFPA), Quincy MA.
- Radke L.F., Lyons J.H., Hobbs P.V., Hegg D.A., Sandberg D.V. and Ward D.E., 1990. Airborne monitoring and smoke characterization of prescribed fires on forest lands in western Washington and Oregon: Final report. U.S. Department of Agriculture Forest Service, Pacific Northwest Research Station.

- Reed M.D., Campen M.J., Gigliotti A.P., Harrod K.S., McDonald J.D., Seagrave J.C. and Mauderly J.L., 2006. Health effects of subchronic exposure to environmental levels of hardwood smoke. *Inhalation Toxicology*, 18: 523-539.
- Reh C.M. and Deitchman S.D., 1988. Investigation of a geothermal area in the northeast region of Yellowstone National Park. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH).
- Reh C.M. and Deitchman S.D., 1992. Health hazard evaluation report: U.S. Department of the Interior, National Park Service, Yellowstone National Park, Wyoming. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH).
- Reh C.M., Letts D. and Deitchman S., 1994. Health hazard evaluation report: U.S. Department of the Interior National Park Service, Yosemite National Park, California. National Institute of Occupational Health and Safety (NIOSH),
- Reinhardt T.E. and Ottmar R.D., 1997. Smoke exposure among wildland firefighters: A review and discussion of current literature. United States Department of Agriculture Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Portland, Oregon.
- Reinhardt T.E., Ottmar R.D. and Hallett M.J., 1999. Guide to monitoring smoke exposure of wildland firefighters. United States Department of Agriculture Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Seattle, Washington.
- Reinhardt T.E. and Ottmar R.D., 2000. Smoke exposure at Western wildfires. United States Department of Agriculture Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Portland, Oregon.
- Reinhardt T.E., Ottmar R.D. and Hanneman A., 2000. Smoke exposure among firefighters at prescribed burns in the Pacific Northwest. United States Department of Agriculture Forest Service, Pacific Northwest Research Station.
- Reinhardt T.E. and Ottmar R.D., 2004. Baseline measurements of smoke exposure among wildland firefighters. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 1 (9): 593-606.
- Reinhardt T.E., 2007. Personal communication.
- Reisen F., Brown S. and Cheng M., 2006. Air Toxics in Bushfire Smoke: Firefighter's Exposure during Prescribed Burns. 5th International Conference on Forest Fire Research.
- Reisen F. and Brown S.K., 2006. Implications for community health from exposure to bushfire air toxics. *Environmental Chemistry*, 3: 235-243.
- Reisen F., Meyer M. and Hansen D., 2007. Firefighter's exposure to air toxics during prescribed burns. *New Research from the Bushfire Cooperative Research Centre*, (12):
- Rosado L., Tichy A., Arnall D., Rasmussen S. and Cornwall M., 1990. The effect of wood fire smoke on U.S. Forest Service firefighters. Meeting of the American Physical Therapy Association.
- Rothman N., Ford D.P., Baser M.E., Hansen J.A., O'toole T., Tockman M.S. and Strickland P.T., 1991. Pulmonary function and respiratory symptoms in wildland firefighters. *Journal of Occupational Medicine*, 33 (11): 1163-1167.
- Ruby B.C., Shriver T.C., Zderic T.W., Sharkey B.J., Burks C. and Tysk S., 2002. Total energy expenditure during arduous wildfire suppression. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 34 (6): 1048-1054.
- Ruby B.C., Leadbetter G.W., Armstrong D.W. and Gaskill S.E., 2003a. Wildland firefighter load carriage: effects on transit time and physiological responses during simulated escape to safety zone. *International Journal of Wildland Fire*, 12 (1): 111-116.

- Ruby B.C., Schoeller D.A., Sharkey B.J., Burks C. and Tysk S., 2003b. Water turnover and changes in body composition during arduous wildfire suppression. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 35 (10): 1760-1765.
- Sama S.R., Martin T.R., Davis L.K. and Kriebel D., 1990. Cancer incidence among Massachusetts firefighters, 1982-1986. *American Journal of Industrial Medicine*, 18 (1): 47-54.
- Scarino, A. and Tardif, R. (2005). Modélisation de l'exposition au monoxyde de carbone. Studies and Research Reports, R-433. Institut de Robert-Sauvé en santé et sécurité du travail (IRSST), Montreal, Quebec.
- Sim V.M. and Pattle R.E., 1957. Effect of possible smog irritants on human subjects. *Journal of the American Medical Association*, 165 (15): 1908-1913.
- Simoneit B.R.T., 2002. Biomass burning: A review of organic tracers for smoke from incomplete combustion. *Applied Geochemistry*, 17: 129-162.
- Slaughter J.C., Koenig J.Q. and Reinhardt T.E., 2004. Association between lung function and exposure to smoke among firefighters at prescribed burns. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 1 (1): 45-49.
- Smith M.A., Jalaludin B., Byles J.E., Lim L. and Leeder S.R., 1996. Asthma presentations to emergency departments in western Sydney during the January 1994 bushfires. *International Journal of Epidemiology*, 25 (6): 1227-1236.
- SOPFEU, 2003. Rapport annuel. Société de protection des forêts contre le feu, Québec.
- Speitel L.C., 1995. Toxicity assessment of combustion gases and development of a survival model. (DOT/FAA/AR-95/5). U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration (FAA), Atlantic City International Airport, New Jersey.
- Steenland K., 1996. Epidemiology of occupation and coronary heart disease: Research agenda. *American Journal of Industrial Medicine*, 30: 495-499.
- Stewart R.D., Fisher T.N., Baretta E.D. and Herrmann A.A., 1973. Experimental human exposure to high concentrations of carbon monoxide. *Archives of Environmental Health*, 26: 1-7.
- Straif K., Baan R., Gross Y., Secretan B., El Ghissassi F., Coglianò V., Smith K., Chen G., White P., Gao Y.-T., Yu I.T., Sinton J., Balakrishnan K., Romieu I., Chapman R.S., Bruce N., Barnes D., Bond J., Demarini D., Lan Q., Lewtas J., Reed M.D., Wallace I., Wu A. and Zhang J., 2006. Carcinogenicity of household solid fuel combustion and of high-temperature frying. *Lancet Oncology*, 7: 977.
- Straif K., Baan R., Grosse Y., Secretan B., El Ghissassi F., Bouvar V., Altieri A., Benbrahim-Tallaa L., Coglianò V., On Behalf of the IARC Working Group, Arendt J., Austin C.C., Blair A., Blask D., Brock T., Bratveit M., Burgess J.C., Costa G., Davis S., Demers P., Hansen J., Haus E., Huici-Montagud A., Landrigan P.J., Lemasters G.K., Lévi F., Merletti F., Portier C., Pukkala E., Schernhammer E., Steenland K., Stevens R., Vermeulen R., Zheng T. and Zhu Y., 2007. Carcinogenicity of shiftwork, painting, and firefighting. *Lancet Oncology*, 8: 1065-1066.
- Stuhmiller J.H., Long D.W. and Stuhmiller L.M., 2006. An internal dose model of incapacitation and lethality risk from inhalation of fire gases. *Inhalation toxicology*, 18 (5): 347-364.
- Thomas P.T. and Zelikoff J.T., 1999. Air pollutants: Modulators of pulmonary host resistance against infection. IN: Air pollution and health. Ed.: Holgate S.T., Samet J.M., Koren H.S. and Maynard H.S. Academic Press, San Diego, 357-379.

- Tornling G., Gustavsson P. and Hogstedt C., 1994. Mortality and cancer incidence in Stockholm firefighters. *American Journal of Industrial Medicine*, 25: 219-228.
- Tzanakis N., Kallergis K., Bouros K.E., Samiou M.F. and Sifakas N.M., 2001. Short-term effects of wood smoke exposure on the respiratory system among charcoal production workers. *Chest*, 119 (4): 1260-1265.
- USDA Forest Service, 1989. The effects of forest fire smoke on fire fighters: A comprehensive study plan. United States Department of Agriculture Forest Service, Intermountain Research Station, Missoula MT.
- Vena J.E. and Fielder R.D., 1987. Mortality of a municipal-worker cohort: IV. Firefighters. *American Journal of Industrial Medicine*, 11: 671-684.
- Vines R.G., 1976. Characteristics and behaviour of bushfire smoke. International Symposium: Air Quality and Smoke from Urban and Forest Fires, National Academy of Sciences, Washington DC.
- Weibel E.R., 1984. The pathway for oxygen: structure and function of the mammalian respiratory system. Harvard University Press, Cambridge MA.
- Westerterp K.R., Saris W.H., Van Es M. and Ten Hoor F., 1986. Use of the doubly labeled water technique in humans during heavy sustained exercise. *Journal of Applied Physiology*, 61: 2162-2167.
- Zelikoff J.T., Chen L.C., Cohen M.D. and Schlesinger R.B., 2002a. The toxicology of inhaled woodsmoke. *Journal of Toxicology and Environmental Health Part B*, 5 (3): 269-282.
- Zelikoff J.T., Chen L.C., Cohen M.D. and Schlesinger R.B., 2002b. The toxicology of inhaled woodsmoke. *Journal of Toxicology and Environmental Health*, 85: 269-282.