

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	iii
REMERCIEMENTS	v
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
LISTE DES FIGURES.....	ix
INTRODUCTION	1
Statistiques relatives à la santé et au métier	3
CADRE THÉORIQUE	5
Environnement de travail et exigences du métier	5
Description des tâches du métier.....	6
Qualités physique et physiologiques essentielles au métier de pompier.....	7
Puissance, force et endurance musculaires.....	7
Puissance et endurance aérobies.....	10
Puissance et capacité anaérobies	12
Acclimatation à la chaleur	14
Composition corporelle	17
Effets de l'ARA et du port de l'EPP	18
Effets de l'âge sur la condition physique et le métier de pompier.....	20
Différences physiologiques intersexuelles et le métier de pompier	21
Autres facteurs liés à la performance du pompier	22
PROBLÉMATIQUE.....	24
HYPOTHÈSES	26
ARTICLE.....	27
Abstract.....	28
Introduction.....	28
Materials and methods.....	30

Results.....	37
Discussion	46
Conclusion	50
Practical implications.....	51
References	52
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	59
LIMITES, PERSPECTIVES ET RETOMBÉES	60
RÉFÉRENCES.....	62

RÉSUMÉ

La condition physique est un facteur important pour accomplir les tâches du métier de pompier, car celles-ci peuvent être physiquement très exigeantes. L'objectif est surtout de les réaliser le plus efficacement, en ventilant le moins d'air possible pour une intensité de travail donnée, car le temps d'une intervention dans le feu pourrait être limité par la durée du réservoir d'air. Cette économie d'air pourrait prolonger l'intervention du pompier et lui permettre au besoin de terminer une tâche cruciale. Il est probable qu'une condition physique supérieure engendre une meilleure économie d'air pour d'une intensité de travail donnée. Ainsi, l'objectif principal de cette étude est de déterminer si les pompiers les plus rapides et en meilleure condition physique, lors d'un test simulant les tâches du métier de pompier, sont aussi ceux qui ventilent le moins d'air pour une même charge de travail. Cette étude a pour but complémentaire de déterminer s'il existe une relation entre la performance à un test simulant les tâches du métier de pompier et la capacité à extraire l'oxygène dans le muscle squelettique des membres inférieurs.

Treize pompiers de sexe masculin (âge: 28.4 ± 5.1 ans; taille: 175.5 ± 4.5 cm; poids: 84.4 ± 9.0 kg; $\text{VO}_{2\text{pic}}$: 47.8 ± 5.1 $\text{mlO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) ont participé à trois différents tests effectués lors de trois différentes journées. 1- Un test progressif jusqu'à épuisement sur tapis roulant (GWT), 2- un test sur tapis roulant représentant une intensité de 10

METS (T10) et 3- un test simulant les tâches du métier de pompier en gymnase (SWC), similaire au test de Deakin et al. (1996). Les échanges gazeux et l'oxygénation musculaire du vaste latéral droit (oxyhémoglobine, HbO₂; désoxyhémoglobine, HHb; hémoglobine totale, THb; différence de concentration de l'hémoglobine, HbDiff; saturation du muscle en oxygène, TSI%) ont été mesurés lors de tous les tests. Les pompiers qui ont réalisé le SWC le plus rapidement sont ceux qui ventilaient le moins d'air dans leur réservoir d'air à une intensité de 10 METS sur tapis roulant ($r = -0.495$; $P < 0.05$). De plus, ces derniers ont atteint un palier d'effort supérieur lors du test progressif sur tapis roulant ($r = -0.789$; $P < 0.001$) dans lequel ils ont obtenu un VO₂pic relatif supérieur ($r = -0.924$; $P < 0.001$). La performance au SWC était significativement corrélée avec la capacité à extraire l'oxygène dans le muscle squelettique (HbO₂ moyen, $r = 0.676$, $P < 0.01$; HHb moyen, $r = -0.593$, $P < 0.05$; HbDiff moyen, $r = 0.768$, $P < 0.01$; TSI% moyen, $r = 0.604$, $P < 0.05$). Ces résultats démontrent que les pompiers les plus performants à un test simulant les tâches du métier sont les plus économes d'air à une intensité donnée et ont une capacité à extraire plus d'oxygène dans le muscle squelettique pendant le SWC. Cette économie d'air accrue pourrait permettre aux pompiers en meilleure condition physique d'effectuer une tâche difficile dans le feu plus longtemps.

REMERCIEMENTS

Je souhaite remercier sincèrement les personnes qui m'ont aidé et qui ont contribué à l'élaboration de cette recherche. Je tiens à remercier mon directeur de recherche, Claude Lajoie, Ph.D., pour sa disponibilité et ses nombreuses idées. Sa confiance et son appui ont été importants durant la réalisation de cette recherche et ont contribué à enrichir mon cursus universitaire. Je désire aussi remercier François Trudeau, Ph.D., qui, en tant que co-directeur, m'a appuyé et guidé lors de plusieurs prises de décision importantes dans la recherche. Les remerciements s'adressent également au professeur Louis Laurencelle, Ph.D., pour sa disponibilité et pour ses conseils dans mes nombreux questionnements. Je tiens aussi à exprimer toute ma gratitude envers Eduardo Freiburger pour son indispensable collaboration lors des expérimentations et lors des discussions au laboratoire. Je n'oublie pas ma conjointe Marie-Christine, ma famille et mes amis, qui m'ont soutenu et encouragé tout au long de ce projet. Je tiens aussi à remercier tous les pompiers qui ont participé à cette étude et l'ont fait avec enthousiasme et générosité. Merci aussi au Service de sécurité incendie de Shawinigan et au Service de la sécurité publique de Trois-Rivières (incendie) pour leur soutien, le prêt d'équipement et le recrutement des participants. Je remercie également les professeurs, le personnel de soutien et les stagiaires en kinésiologie du département des sciences de l'activité physique de l'UQTR.

LISTE DES ABRÉVIATIONS

Abréviation	Signification	Unité de mesure
ARA (SCBA)	Appareil respiratoire autonome	
ATP	Adénosine triphosphate	
bpm	Battements par minute	bpm
DC ou Q	Débit cardiaque	L/min
EPJ	Exigence professionnelle justifiée	
EPP (FPE)	Équipement de protection personnelle	
FC (HR)	Fréquence cardiaque	bpm
FCmax	Fréquence cardiaque maximale	bpm
FCR	Fréquence cardiaque de réserve	bpm
FR	Fréquence respiratoire	cycle/min
GWT	Test progressif jusqu'à épuisement	
HbO ₂	Oxyhémoglobine	Unité arbitraire
HHb	Désoxyhémoglobine	Unité arbitraire
IMC (BMI)	Indice de masse corporelle	kg/m ²
MET	Équivalent métabolique	
PSI	Pound per square inch	psi
QR (RER)	Quotient respiratoire	

SWC	Test simulant les tâches du pompier	
T10	Test à une intensité de 10 METS	
THb	Quantité totale d'hémoglobine	Unité arbitraire
TSI%	Saturation du muscle en oxygène	%
VC	Volume courant	ml
V _E	Ventilation pulmonaire	L/min
VES	Volume d'éjection systolique	ml/battement
VO ₂	Consommation d'oxygène	ml·min ⁻¹ ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹
VO ₂ max	Consommation maximale d'oxygène	ml·min ⁻¹ ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹
VO ₂ pic (VO ₂ peak)	Sommet de consommation d'oxygène	ml·min ⁻¹ ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹
VO ₂ R	Consommation d'oxygène de réserve	ml·min ⁻¹ ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹

LISTE DES TABLEAUX

Table 6-1. Descriptive data of participants.....	37
Table 6-2. Pearson correlations between time to ventilate air (for different air pressure decreases) and SWC completion time and VO_2 peak.....	41
Table 6-3. Pearson correlations between SWC completion time and different physiological parameters in different grades of the GWT.....	42
Table 6-4. Pearson correlations between VO_2 peak and different physiological parameters in different grades of the GWT.....	43
Table 6-5. Pearson correlations between SWC completion time and muscle oxygenation parameters during SWC.....	45
Table 6-6. Pearson correlations between VO_2 peak achieved during the GWT and muscle oxygenation parameters during SWC.....	46

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1. Schéma des facteurs principaux influençant la performance des pompiers..	22
Figure 6-1. Relationship between time to ventilate 1850 psi from air cylinder at 10 METS and SWC completion time.....	39
Figure 6-2. Relationship between time to ventilate 1850 psi from air cylinder at 10 METS and VO_{2peak}	40
Figure 6-3. HbO_2 , HHb, THb, HbDiff and TSI% during each task of the SWC.....	44



INTRODUCTION

En raison de la grande demande physiologique et psychologique qu'exige le métier de pompier, il est de nos jours l'un des métiers les plus exigeants et dangereux au monde en condition d'urgence, sur le plan physique. Contrairement à plusieurs autres métiers, l'imprévisibilité de celui-ci rend impossible une planification de périodes de repos durant l'intervention. Évidemment, plus le pompier présentera une capacité physique importante, moins le travail sera exigeant pour une tâche donnée et pour une même technique de travail utilisée. Cela optimisera ainsi le niveau de santé et sécurité au travail et de productivité. La sécurité des citoyens (victimes potentielles), de ses coéquipiers et de lui-même est souvent à risque lors d'une intervention. La condition physique joue alors un rôle important. Malgré cela, les services de sécurité incendie des différentes villes du Québec n'administrent pas de test annuel de maintien de la condition physique.

Depuis quelques années, le Service de sécurité incendie de Shawinigan tend à établir cette pratique innovatrice au sein de leur établissement. L'objectif est d'aider ces travailleurs à améliorer leur condition physique afin que tous en bénéficient. Pour évaluer la condition physique des pompiers, les tests doivent respecter les principes énoncés par la Commission canadienne des droits de la personne («Canadian Human

Rights Act»). Pour ce faire, il faut s'assurer que les tests d'aptitude ne soient pas ni discriminatoires (âge, sexe, race, etc.), ni injustifiés. Cependant, il existe une clause d'exception qui permet à certaines professions de refuser, d'exclure, d'expulser, de suspendre et de limiter l'exercice de la fonction si l'employeur démontre clairement que la fonction est basée sur des exigences professionnelles justifiées (EPJ), en anglais «bona fide occupational requirement (BFOR)». Le protocole d'évaluation utilisé doit, par contre, évaluer les exigences physiques spécifiques de la profession pour éviter toute forme d'injustice ou de discrimination.

En faisant appel aux chercheurs en physiologie de l'exercice de l'UQTR, le Service de sécurité incendie de Shawinigan voulait implanter ce type de suivi annuel. Ce projet innovateur est le premier à être mis en place au Québec. De là vient la pertinence de réaliser un projet de recherche scientifique dans le but d'établir un lien entre la performance à un test simulant les tâches du métier de pompier et les exigences physiologiques comme l'économie d'air à l'effort. L'objectif de cette étude est d'étayer l'idée d'implanter éventuellement un test de maintien de la condition physique chez des pompiers. Il est important de se préoccuper de la condition physique et de la mise en forme des pompiers, car elle est aussi un facteur jouant un rôle important dans la santé de ces derniers. Des études ont démontré que le nombre d'accidents et de blessures diminue lorsque les pompiers satisfont aux exigences physiques de la profession (Adams 1986; Davis et Dotson 1987).

Statistiques relatives à la santé et au métier

Au Canada, il n'y a pas de bases de données officielles relatant les statistiques sur les morts reliées au milieu de travail des pompiers. Malgré l'absence de telles statistiques chez les pompiers canadiens, la similitude entre la société canadienne et celle des États-Unis incite à considérer les données américaines plus attentivement. Selon l'*United States Fire Administration (USFA)*, 50 et 45 pompiers sont morts en 2011 et en 2012 respectivement de stress ou de surmenage, dont 48 et 39 d'une crise cardiaque, la cause la plus fréquente de décès. Ces données servent donc de signal d'alerte sur les risques d'accidents liés au stress et au surmenage chez les pompiers. De plus, plusieurs études observent que l'incidence de cardiopathies et d'infarctus du myocarde est élevée chez les pompiers (Barnard et Anthony 1980; Barnard et Duncan 1975; Byrd et Collins 1980). Les pompiers déconditionnés ont un risque de 90% plus élevé d'avoir un infarctus du myocarde que ceux possédant une bonne condition aérobie (Powell, Thompson, Caspersen et Kendrick 1987). La sédentarité, les mauvaises habitudes de vie, l'exposition aux fumées toxiques et les stress psychologiques et physiologiques de ce travail augmentent le risque de maladies cardiovasculaires (Barnard et Duncan 1975; Green et Crouse 1991; Guidotti 1992). De plus, chez 433 pompiers, Kuehl et al. (2012) ont observé un quasi triplement des demandes d'indemnisation en lien avec un accident de travail chez les gens ayant un IMC supérieur à 30 kg/m², comparativement aux gens ayant un IMC inférieur à 25 kg/m². Ces résultats d'études confirment la nécessité d'améliorer la condition physique des pompiers dans le but de protéger leur santé.

D'autres statistiques ont aussi fait état de la situation des pompiers du Québec au niveau des lésions musculosquelettiques. Dans le rapport *Lombalgies et accidents musculosquelettiques chez les pompiers*, l'Association pour la santé et la sécurité du travail - secteur Affaires municipales note que la manutention et le soulèvement de charges lourdes est la seconde cause en importance de lésion musculosquelettique (24 % des cas rapportés). Cela a été observé en 1992-1993 dans deux services incendie du Québec. Finalement, il a été démontré que d'avoir de meilleures qualités musculaires aide à prévenir les blessures d'ordre musculosquelettique (Cady, Bischoff, O'Connell, Thomas et Allan 1979; Willson, Dougherty, Ireland et Davis 2005).

CADRE THÉORIQUE

Environnement de travail et exigences du métier

Plusieurs études ont démontré que les tâches des pompiers exigent une dépense énergétique importante qui, dans certaines conditions, s'approche de la capacité physique maximale individuelle (Baker, Grice, Roby et Matthews 2000; Bos, Mol, Visser et Frings-Dresen 2004; Gledhill et Jamnik 1992). Il faut porter attention aux tâches exigeant une dépense énergétique très élevée et qui peuvent amener à la fatigue excessive (Bos et al. 2004). Une étude a démontré que, durant les tâches les plus exigeantes, le pompier dépense environ 50 à 55,5 kJ/min (environ 715 à 800 kcal/h) (Bugajska, Zuzewicz, Szmauz-Dybko et Konarska 2007). De plus, l'*Organisation internationale du travail* (OIT) recommande depuis 1983 que la FC moyenne pendant des tâches de travail de haute intensité ne dépasse pas 150 bpm et, selon Wu et Wang (2001), que le pic de FC ne dépasse pas 180 bpm. Ces derniers chercheurs ont, dans une autre étude (2002), développé un calcul pour déterminer la durée maximale acceptable de travail d'un individu basée sur son pourcentage de FC de réserve ou de VO_2 de réserve. Dans cette étude, ils suggèrent aussi différentes charges maximales acceptables pour différentes durées de travail. La connaissance de la durée maximale acceptable d'une tâche permet la planification et l'inclusion de périodes de repos pendant une journée de travail pour prévenir la fatigue ou le surmenage. Par contre, tel que mentionné précédemment, l'imprévisibilité du métier de pompier rend impossible une

planification de périodes de repos. Une bonne capacité physique est donc un pré-requis important pour affronter éventuellement des situations extrêmes. Des études ont démontré que les pompiers atteignent parfois leur fréquence cardiaque maximale lors d'une intervention (Bugajska et al. 2007; Holmér et Gavhed 2007). Ces informations concernent la grande majorité des pompiers du monde. Par contre, au Canada, des conditions particulières rendent l'accomplissement de cette profession encore plus difficile physiquement. Le climat hivernal et les tempêtes de neige compliquent la réalisation des tâches en augmentant la demande énergétique. Cela pourrait nécessiter une condition physique encore plus élevée.

Description des tâches du métier

Conformément à la description faite par le ministère des Ressources humaines et Développement des compétences du Canada, les fonctions que peuvent exercer les pompiers sont, par exemple: répondre aux alertes d'incendie, sauver des victimes des bâtiments en feu et des lieux d'accidents, contrôler et éteindre des incendies au moyen d'équipement manuel et mécanique, tel que des haches, des boyaux d'arrosage et des échelles pivotantes, utiliser du matériel hydraulique et divers produits chimiques de lutte contre les incendies et donner les premiers soins et toute autre aide requise. Ils doivent aussi s'entraîner afin de maintenir un haut niveau de condition physique, aider le public, la police et les organismes d'intervention d'urgence en cas de désastre et, finalement, accomplir plusieurs autres tâches d'entretien des outils, de prévention de lutte contre les incendies et d'inspection de bâtiments. Plusieurs tâches énumérées précédemment

demandent un niveau de condition physique élevé. Peu importe les techniques de travail utilisées, des outils lourds doivent être transportés fréquemment et être portés et manipulés pendant de longues périodes de temps. Une étude a démontré que la tâche la plus difficile physiquement à accomplir est le sauvetage d'une victime (Bugajska et al. 2007). D'autres études disent plutôt que la plus grande dépense énergétique provient des tâches exigeant de déplacer sa propre masse corporelle contre la gravité avec le port de l'EPP (équipement de protection personnelle) et de l'ARA (appareil respiratoire autonome) en plus de transporter des objets (Bilzon, Scarpello, Smith, Ravenhill et Rayson 2001; Gledhill et Jamnik 1992; Holmér et Gavhed 2007; Lemon et Hermiston 1977; von Heimburg, Rasmussen et Medbo 2006).

Qualités physiques et physiologiques essentielles au métier de pompier

Puissance, force et endurance musculaires

Il est important de souligner que les recherches pertinentes au domaine ne se limitent pas à l'étude de la puissance et de la capacité du système aérobie. Pour accroître la connaissance sur les exigences du travail des pompiers, la force musculaire et l'endurance musculaire et leur contribution à la performance physique font l'objet de plusieurs études. Ces qualités physiques, de pair avec l'endurance cardiovasculaire, jouent un rôle fondamental face aux demandes du métier de pompier. Les équipements utilisés par les pompiers exigent le déploiement de la force absolue et de l'endurance musculaire. D'autres tâches, comme traîner une victime ou porter des outils en montant et descendant des escaliers, exigent aussi que le candidat possède et maintienne ces

qualités physiques à un niveau optimal aussi bien pour performer au test que pour réaliser utilement les tâches de sa profession. La tâche simulant une entrée forcée dans un bâtiment exige une puissance musculaire du haut du corps et du tronc importante. Plusieurs études démontrent que la majorité des tâches du métier de pompier sont significativement corrélées avec le niveau de force et d'endurance musculaires (Dreger et Petersen 2007; Gledhill et Jamnik 1992; Harvey, Kraemer, Sharratt et Hughson 2008; Henderson, Berry et Matic 2007; Michaelides, Parpa, Henry, Thompson et Brown 2011; Rhea, Alvar et Gray 2004; Sheaff et al. 2010; Williford, Duey, Olson, Howard et Wang 1999). D'autres études indiquent aussi que la force musculaire du haut du corps est plus fortement corrélée avec la performance au test de pompier que la force du bas du corps (Rhea et al. 2004; Sheaff et al. 2010). La force de préhension se révèle être un bon prédicteur de la performance aux tests spécifiques du métier, car des études ont démontré que plus un candidat avait une force de préhension importante, plus le test était réalisé rapidement (Sheaff et al. 2010; Williford et al. 1999). Un pompier puissant, fort et endurant musculairement sera plus efficace et plus économe au niveau de la dépense énergétique. Des études ont démontré qu'un niveau plus élevé de puissance, de force et d'endurance musculaires augmente le niveau d'économie d'effort pour une tâche exigeant un effort cardiovasculaire (Mikkola et al. 2011; Paavolainen, Häkkinen, Härmäläinen, Nummela et Rusko 1999; Støren, Helgerud, Støa et Hoff 2008). En fait, Mikkola et al. (2011) observent que les gens ayant une force-endurance relative plus importante ont une lactatémie inférieure pour un même effort aérobie sous-maximal. Ainsi, le système anaérobie lactique contribuerait de façon moins importante à la

production d'énergie pour un effort donné. Cette même étude démontre aussi que la fréquence cardiaque est plus basse pour un même effort sous-maximal aérobie, ce qui laisse croire que le système cardiovasculaire est aussi moins sollicité. De plus, une économie d'énergie en travail sous-maximal aérobie est observée pour les participants ayant un niveau de puissance musculaire plus élevé (Paavolainen et al. 1999). Une plus grande force maximale et un meilleur taux de développement de la force engendrent aussi une économie d'effort pour un même niveau d'intensité de travail (Støren et al. 2008). Selon ces mêmes auteurs, cela serait causé entre autres par de meilleures qualités neuromusculaires, dont la synchronisation des unités motrices, le recrutement des unités motrices et une meilleure coactivation des groupes musculaires. Cette dernière étude décrit aussi que, plus la force est produite rapidement et que le temps de contraction musculaire est raccourci, plus le temps de repos du muscle est grand lors de mouvements répétitifs. Il a été démontré que l'approvisionnement en sang dans le muscle se produit presque exclusivement entre chacune des contractions (Shoemaker, Hodge et Hughson 1994), ce qui laisse théoriquement plus de temps au muscle de se gorger de sang. Ce débit sanguin plus important à l'intérieur des muscles sollicités augmenterait l'accès à l'oxygène et aux substrats énergétiques. Selon Saltin (1985), le temps moyen de repos musculaire entre les contractions est positivement corrélé avec la différence artério-veineuse en oxygène. Cette plus grande utilisation de l'oxygène musculaire limiterait la sollicitation de la filière anaérobie pour produire l'énergie nécessaire. Le temps jusqu'à épuisement est alors augmenté.

Puissance et endurance aérobies

Le système aérobie est la principale filière énergétique soutenant le travail de pompier (Perroni et al. 2010). Une capacité aérobie maximale élevée permet de réaliser un travail sous-maximal avec un effort cardiovasculaire moins important (Sheaff et al. 2010). Par conséquent, la fréquence cardiaque (FC), la consommation d'oxygène (VO_2) la fréquence respiratoire (FR) et le débit d'air ventilé (V_E) durant l'effort sont moins élevés pour une même charge de travail. En d'autres mots, cela signifie que la charge relative de travail est moins exigeante pour une personne possédant une capacité aérobie plus élevée (Holmér et Gavhed 2007). Indépendamment du sexe de l'individu, un sujet ayant une capacité aérobie maximale réduite requiert une contribution plus importante de la filière énergétique anaérobie pour effectuer une tâche de travail donnée. La sollicitation accrue du système anaérobie peut accélérer l'apparition de l'épuisement durant une activité de durée prolongée (Bilzon et al. 2001); la production d'ions hydrogène dans le muscle squelettique est accrue, diminuant ainsi le pH et l'activité des enzymes engagées à la production d'énergie pour la contraction musculaire (Wilmore, Costill et Kenney 2009). En résumé, une faible capacité cardiovasculaire augmente la dépendance au système anaérobie, conduisant à l'épuisement précoce lors d'une période de travail intense, observé par l'augmentation de la lactatémie et du quotient respiratoire pour une charge de travail donnée (Bilzon et al. 2001). De plus, un bon niveau d'endurance aérobie est aussi important pour bien récupérer entre chaque effort intense et pour mieux dissiper la chaleur, un élément à ne pas négliger dans les programmes d'entraînement (Dreger et Petersen 2007; Rhea et al. 2004).

Plusieurs études ont identifié les valeurs de consommation maximale en oxygène nécessaires pour accomplir les tâches du métier. Celles-ci ont été identifiées en se basant sur la consommation moyenne en oxygène des pompiers lors de tests représentant une intervention en situation réelle. Les valeurs obtenues se situent entre 40 et 45 $\text{mlO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ avec des variations allant de 25 $\text{mlO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$, jusqu'à plus de 55 $\text{mlO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ (Bilzon et al. 2001; Gledhill & Jamnik 1992; Holmér et Gavhed 2007; Lemon et Hermiston 1977; von Heimburg et al. 2006). L'utilisation de méthodologies différentes entre les études a pu jouer un rôle dans la variation des valeurs obtenues. En moyenne, lors d'un test simulant les tâches du métier, les pompiers atteignent un pic de consommation d'oxygène représentant 80-85% de leur $\text{VO}_{2\text{max}}$ (Bilzon et al. 2001; Dreger et Petersen 2007; Gledhill et Jamnik 1992; Sothmann, Saupe, Jasenof et Blaney 1992; von Heimburg et al. 2006). Les auteurs suggèrent alors d'avoir une consommation maximale d'oxygène d'au moins de 45 $\text{mlO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$. Une étude démontre aussi que les candidats démontrant un $\text{VO}_{2\text{max}}$ absolu plus faible ont été ceux qui étaient les plus lents à un test reproduisant certaines tâches du métier de pompier (von Heimburg et al. 2006).

D'autres études ont aussi démontré que la fréquence cardiaque du pompier atteint presque la fréquence cardiaque maximale lors de l'exécution de certaines tâches du métier (Eglin 2007; Sothmann, Saupe et al. 1992). La fréquence cardiaque ne peut pas être une estimation de la consommation d'oxygène durant les simulations des tâches du pompier, car la fréquence cardiaque est aussi influencée par l'hyperthermie, la

déshydratation et le stress psychologique (Abel, Mortara et Pettitt 2011; Louhevaara, Ilmarinen, Griefahn, Künemund et Mäkinen 1995; Sothmann, Saupe et al. 1992; Sothmann et al. 1991). Par exemple, il a été observé que la fréquence cardiaque augmente d'environ 50 bpm immédiatement après le son de l'alarme mobilisant pour une intervention (Barnard et Duncan 1975).

Enfin, au niveau périphérique, aucune étude jusqu'à maintenant n'a fait part de résultats provenant d'analyses de l'oxygénation musculaire à l'effort chez des pompiers. Pourtant, tel que mentionné précédemment, plusieurs tâches du métier de pompier sollicitent de façon importante plusieurs groupes musculaires, dont la musculature des membres inférieurs. Kawaguchi et al. (2001) mentionnent que la capacité du muscle squelettique à extraire/utiliser l'oxygène reflète la consommation d'oxygène systémique. L'oxygénation musculaire pourrait être un facteur important de la performance des pompiers lors des tâches de la profession. Plusieurs paramètres périphériques comme la capillarisation, l'activité des enzymes oxydatives et la densité mitochondriale, pourraient contribuer à une meilleure extraction/utilisation d'oxygène dans le muscle squelettique.

Puissance et capacité anaérobies

La filière du système énergétique anaérobie est aussi sollicitée lors de la réalisation des tâches du métier de pompier. Quelques études ont démontré qu'un meilleur développement de la puissance et de la capacité des système alactique et

lactique améliore les performances des pompiers lors de l'exécution des tâches spécifiques du métier (Dreger et Petersen 2007; Gledhill et Jamnik 1992; Michaelides et al. 2011; Rhea et al. 2004; Sheaff et al. 2010; Williford et al. 1999). Une autre étude affirme que le métabolisme anaérobie participe pour environ 30 à 40% de la production d'énergie pendant les tâches simulées pour pompiers (Bilzon et al. 2001). On observe aussi que, après seulement quelques tâches, le quotient respiratoire (QR) est supérieur à 1,00 jusqu'à la fin d'une intervention ou d'un test (Dreger et Petersen 2007; Harvey et al. 2008). L'étude de Harvey et al. (2008) démontre aussi que le quotient respiratoire est plus élevé, à 60-70% du VO_2max , lors des tâches simulées chez les pompiers en comparaison à celui observé chez les cyclistes et les coureurs de fond. Les efforts répétés quasi maximaux sont probablement la cause de la contribution supérieure du métabolisme anaérobie. En plus du quotient respiratoire, les valeurs de concentration sanguine en lactate à la fin d'un test spécifique aux tâches du métier se situent normalement entre 2,2 et 13 mmol/L (Eglin, Coles et Tipton 2004; Gledhill et Jamnik 1992; Holmér et Gavhed 2007; von Heimburg et al. 2006) et peuvent même atteindre jusqu'à 15,5 mmol/L (Petersen, Dreger, Williams et McGarvey 2000). Ces résultats démontrent que le métabolisme anaérobie est sollicité de façon importante lors de la réalisation de tâches simulées spécifiques au métier de pompier. Finalement, des chercheurs mentionnent que la combinaison de la capacité anaérobie et du VO_2max absolu est le meilleur prédicteur de performance aux tâches individuelles comme le tirage de sections de tuyau, le lever de l'échelle, l'entrée par effraction et le sauvetage d'une victime (Sheaff et al. 2010).

L'acclimatation à la chaleur

En plus de l'endurance aérobie, des qualités musculaires et de la capacité anaérobie, la résistance à la chaleur pour éviter l'épuisement est une autre qualité requise chez le pompier. Cette capacité est définie comme étant l'habileté à éliminer la chaleur corporelle lors du métabolisme et de l'exposition à un environnement chaud. Lorsque la production métabolique de chaleur est augmentée, les équipements de protection personnelle (EPP) et la température du feu rendent très difficile la libération de chaleur à l'extérieur du corps. Cet équipement de protection limite la dissipation de la chaleur créée par le travail physique, en empêchant l'évaporation de la sueur (Petruzzello, Gapin, Snook et Smith 2009; Sköldström 1987). Des chercheurs mentionnent que le plus important effort physiologique des pompiers pendant un test sur ergocycle dans un environnement de chaleur provient du stress thermique provoqué par le microclimat humide développé dans l'habit protecteur (Faff et Tutak 1989). On a mesuré une température moyenne d'environ 48°C et une température maximale de 62°C entre l'EPP et les sous-vêtements (Rossi 2003). Ces facteurs augmentent le risque d'épuisement lié à la chaleur, c'est-à-dire un désordre résultant de l'incapacité du système cardiovasculaire à subvenir aux différents besoins de l'organisme exposé à une ambiance chaude. Ce désordre se caractérise par l'élévation de la température corporelle, l'essoufflement, un rythme cardiaque rapide, une fatigue extrême et des étourdissements (Wilmore et al. 2009). De plus, la déshydratation joue un rôle important dans l'élévation de la température rectale et de la fréquence cardiaque (Gavhed et Holmér 1989). Ils mentionnent aussi que la perte de masse corporelle par la sudation

peut atteindre 1,5% et ainsi augmenter le risque de déshydratation et de coup de chaleur (Gavhed et Holmér 1989). Des chercheurs démontrent aussi que trois heures de travail intermittent en situation réelle de feu amènent une diminution d'environ 3,3% du volume plasmatique chez le pompier (Fernhall, Fahs, Horn, Rowland et Smith 2012). De plus, une étude a permis de mesurer une augmentation de la fréquence cardiaque en milieu chaud causant ainsi une augmentation du débit cardiaque pour activer les muscles et pour augmenter la dissipation de la chaleur en augmentant la circulation cutanée (Eglin 2007). Le volume d'éjection systolique étant maximal à 50% du $VO_2\text{max}$, l'augmentation du débit cardiaque doit alors être relayée par une augmentation de la FC (Eglin 2007). Plusieurs autres études ont des résultats intéressants face à cette problématique. D'abord, des auteurs ont étudié les effets de la chaleur causés par le feu chez les pompiers (Bruce-Low, Cotterrell et Jones 2007). Ils ont comparé une séance d'entraînement d'environ 35 minutes à une température moyenne ($15,1^{\circ}\text{C}$) avec une séance à température élevée ($17,8^{\circ}\text{C}$). Ils ont observé que la FC moyenne durant des tâches à température modérée et élevée étaient de 84,2 et de 134,0 bpm respectivement. De plus, ils observent un sommet moyen de la FC de 103 bpm en ambiance moyenne et de 156 bpm pour la température élevée. Pour ce qui est de la température corporelle des participants en ambiances moyenne et élevée, ceux-ci affichaient une température moyenne de $36,1^{\circ}\text{C}$ et $38,3^{\circ}\text{C}$. Également, les chercheurs constatent que la perception d'effort en ambiance moyenne s'élevait à 8,3, alors qu'en ambiance élevée elle était haussée à 12,8 sur une échelle perceptive de 20. Malgré la température externe élevée, la température corporelle des participants de ce groupe était demeurée dans des limites

acceptables, suggérant une thermorégulation adéquate. De plus, le rapport entre la FC, la température corporelle et la perception de l'effort durant un circuit de 5 tâches, avec le port des équipements de protection personnelle (EPP) dans des conditions contrôlées semblables à la réalité, c'est-à-dire avec feu, a été étudié (Petruzzello et al. 2009). Le port des EPP a donné des valeurs physiologiques et de perception d'effort les plus élevées en comparaison aux conditions sans EPP ou en condition thermique externe neutre. Selon la durée de l'intervention dans le feu, l'accroissement du temps de travail accroît la charge physiologique du pompier qui porte ses EPP. Smith, Petruzzello, Kramer et Misner (1997) observent aussi une augmentation d'environ 37 bpm et d'environ 2,91°C lorsqu'un pompier exécute les mêmes tâches dans un environnement à température élevée. La concentration sanguine en lactate est aussi plus élevée. Ceci démontre que le métabolisme anaérobie est plus sollicité, laissant croire que l'intensité de travail est plus importante pour les mêmes tâches dans un climat de chaleur. Enfin, le fait d'avoir une bonne condition physique aérobie et musculaire augmente la capacité de dissipation de la chaleur et rend le pompier plus efficace sous ces conditions environnementales extrêmes (Wilmore et al. 2009). Les bénéfices physiologiques de l'entraînement physique du système cardiovasculaire sont semblables à ceux obtenus par l'acclimatation à la chaleur (Gavhed et Holmér 1989). Par contre, Wilmore et al. (2009) mentionnent que le meilleur moyen d'acclimatation à la chaleur est encore de s'entraîner en ambiance chaude.

Composition corporelle

La capacité physique des pompiers dépend aussi de leur composition corporelle. D'abord, plus un pompier est imposant physiquement, plus il est probable qu'il soit fort et plus il lui est aisé de transporter une victime ou un objet lourd (Harvey et al. 2008; Holmér et Gavhed 2007; von Heimburg et al. 2006). Ainsi, il est logique d'affirmer que, pour une masse donnée à transporter, le pompier d'un gabarit plus important est relativement moins sollicité physiquement qu'un pompier présentant un gabarit plus petit. Le pompier plus imposant physiquement semble être plus efficace pour exécuter une même tâche exigeant de la force musculaire. On observe aussi que la température de la peau des pompiers moins costauds était plus élevée lors d'une phase de récupération après une période d'effort (Del Sal et al. 2009). Outre la taille et la masse corporelle, le pourcentage de masse adipeuse apparaît aussi être un facteur à ne pas négliger. En fait, plus un pompier possède un faible pourcentage de gras et un fort pourcentage de masse maigre, plus il sera performant à un test représentant diverses tâches du métier (Williford et al. 1999). Une étude a démontré qu'un surplus de masse adipeuse joue un rôle d'isolateur et rend donc la dissipation de la chaleur difficile et contribue alors à une augmentation de la température corporelle (McLellan 1998). De plus, un surplus de poids augmente le niveau de stress physique et surtaxe le système cardiovasculaire (Del Sal et al. 2009). On observe ce phénomène lors de la réalisation de la majorité des tâches du métier, mais surtout lors des tâches qui exigent d'élever son propre poids corporel comme la montée des escaliers ou sur l'échelle (Williford et al. 1999). Un indice de

masse corporelle (IMC) élevé et un tour de taille important sont aussi associés à une moins bonne performance physique chez les pompiers (Michaelides et al. 2011).

Effets de l'ARA et du port de l'EPP

Dans la littérature scientifique, plusieurs études ont démontré des effets limitatifs de l'appareil respiratoire autonome (ARA) et du port de l'équipement de protection personnelle (EPP) sur la performance physique des pompiers. Bos et al. (2004) notent que les tâches où le pompier porte l'EPP et l'ARA excèdent les valeurs maximales de charge de travail recommandées décrites dans le guide de Wu et Wang (2001). La masse totale d'environ 20 à 25 kg de l'ARA et de l'EPP a des répercussions majeures sur les paramètres physiologiques. Del Sal et al. (2009) mentionnent que le simple fait de se tenir debout sans et avec l'équipement engendre une différence significative au niveau de la fréquence cardiaque. Le port d'un équipement d'environ 24 kg, dans un environnement où la température est régulière, diminue approximativement de 25% la performance physique, c'est-à-dire le temps de travail et la vitesse maximale de marche selon Louhevaara et al. (1995). Cette diminution semble être reliée à la masse additionnelle de l'ARA et de l'EPP. Ce même groupe d'auteurs observe que la capacité anaérobie et la «stature» du pompier sont les caractéristiques physiques et physiologiques les plus importantes pour prédire une plus petite diminution de

l'efficacité de travail et de puissance lors du port de l'équipement protecteur complet pendant un travail dynamique vigoureux. Baker et al. (2000) observent aussi une augmentation de la FC de 17% et du VO_2 de 11% à une vitesse de marche de 7 km/h avec le port de l'EPP comparativement au port d'un habit régulier de sport. Ils notent aussi que marcher à une vitesse de 7 km/h pendant 12 minutes représente environ 74% du VO_2max à température moyenne avec le port de l'équipement de protection personnelle. Dans le même ordre d'idées, Dreger, Jones et Petersen (2006) observent une réduction de 18% du VO_2max avec le port de l'EPP et de l'ARA. Cependant, Louhevaara et al. (1995) notent une diminution de 4% du VO_2max avec le port de l'EPP seulement. Eves, Jones et Petersen (2005) ont mesuré une diminution de 14,9% du VO_2max causée par le poids et la résistance mécanique des valves de l'ARA et une diminution de 13,1% avec le port seulement du régulateur de l'appareil sans réservoir d'oxygène. Il est probable que l'ARA soit un facteur important de la diminution de la consommation maximale d'oxygène des pompiers causée majoritairement par la résistance mécanique des valves. Suite à cela, Dreger et al. (2006) ont observé que la diminution du VO_2max est fortement corrélée avec la diminution de la V_E . Ils démontrent que cette diminution est causée par une réduction significative du volume courant. Ce dernier plafonne à environ 80% du VO_2max avec le port de l'EPP et de l'ARA, ce qui correspond à 83% du volume courant maximal atteint avec le port de vêtements de sport. La fréquence respiratoire augmente alors pour maintenir le niveau de V_E . Finalement, ces auteurs notent aussi des valeurs plus élevées du VO_2 , du V_E et de la FC à l'effort sous-maximal avec le port de l'ARA seulement.

Effets de l'âge sur la condition physique et le métier de pompier

Des études ne rapportent aucune corrélation significative entre le niveau de dépense énergétique et l'âge des pompiers (Sothmann, Landy et Saupe 1992; Sothmann et al. 1990). Ces auteurs croient que les plus âgés travailleraient plus lentement mais plus efficacement. Il est certain que l'expérience de travail rend le pompier plus efficace dans le choix de ses méthodes de travail. D'un autre côté, des études ont montré que plus un pompier est âgé, plus la dépense énergétique est élevée pour la réalisation d'une même tâche dans un même délai (Del Sal et al. 2009; Holmér et Gavhed 2007). Le vieillissement engendre une diminution de la capacité physique. Cela influence grandement les pompiers lors de la réalisation des tâches physiquement exigeantes. Wilmore et al. (2009) mentionnent que la masse maigre diminue dès l'âge de 30 à 40 ans de façon significative chez les gens qui ne la préservent pas par l'entraînement physique: cette diminution de masse maigre est causée principalement par la diminution de masse musculaire. Au niveau aérobie, Wilmore et al. (2009) citent que le VO_{2max} diminue d'environ 1% par année à partir de 25 ans ou d'environ 10% par décade. Ceci est principalement causé par une réduction de la FC_{max} , du débit cardiaque maximal, du volume d'éjection systolique maximal et de la fonction respiratoire telle que l'augmentation du rapport volume résiduel/capacité pulmonaire totale. De plus, ces mêmes auteurs indiquent que ces altérations des systèmes cardiovasculaire et respiratoire compromettent l'efficacité des mécanismes thermorégulateurs et de la sudation. Les pompiers plus âgés tolèrent alors moins bien la chaleur.

Les différences physiologiques intersexuelles et le métier de pompier

Comme mentionné précédemment, une bonne condition physique est une priorité pour accomplir les tâches physiquement exigeantes du métier de pompier. Lors d'une intervention, les hommes et les femmes doivent réaliser le même travail. Ce travail exige le même effort physique absolu. Dreger et Petersen (2007) observent que, entre les deux sexes, il n'y a aucune différence significative du coût énergétique requis pour l'accomplissement des tâches en 8 minutes du test de Deakin et al. (1996). Par contre, dans cette même étude, un VO_2 moyen d'environ $34,1 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ est requise pour réussir le test en 8 minutes. Cette valeur représente environ 69% du $\text{VO}_{2\text{pic}}$ chez les participants masculins et 82% chez les participantes. Ces dernières doivent alors travailler à une plus haute fraction de leur $\text{VO}_{2\text{pic}}$ pour réaliser les standards. Wilmore et al. (2009) mentionnent que les femmes atteignent des valeurs physiologiques maximales plus faibles au niveau cardiovasculaire et pulmonaire. La V_E , le VC, le VES et le Q inférieurs à ceux de l'homme sont principalement causés par des raisons morphologiques (dimensions corporelles inférieures) telles que le volume cardiaque, la musculature et le volume pulmonaire. De plus, Wilmore et al. (2009) ajoutent que le volume sanguin total est moindre et que le contenu en hémoglobine est aussi inférieur pour une même quantité de sang: la capacité de transport de l'oxygène est alors réduite. Ces facteurs engendrent une diminution du $\text{VO}_{2\text{max}}$ et des capacités aérobies maximales (Bilzon et al. 2001). Le pourcentage plus élevé de masse adipeuse chez la femme diminue aussi les capacités aérobies maximales. Finalement, les femmes ne sont pas prédisposées à générer autant de force que les hommes, leur masse musculaire étant

moins importante (Wilmore et al. 2009). Cette dernière est localisée principalement au niveau du bas du corps. Cela explique pourquoi la force du haut du corps de la femme relative à leur masse musculaire est inférieure à celle de l'homme.

Autres facteurs liés à la performance du pompier

Malgré tout, le niveau de condition physique n'est pas le seul facteur prédisant la performance des pompiers. Suite à une analyse de régression linéaire multiple, des auteurs mentionnent qu'une portion de 60% du résultat (en variance) obtenu à un test d'habileté spécifique aux tâches du métier de pompier est expliquée par les paramètres de condition physique (Michaelides et al. 2011). Même si une part de variance sérieuse reste à explorer, la condition physique ressort comme le paramètre majeur qui prédit la performance à un test simulant les tâches du métier de pompier. Le schéma suivant énumère bien les facteurs principaux influençant la performance des pompiers au travail.

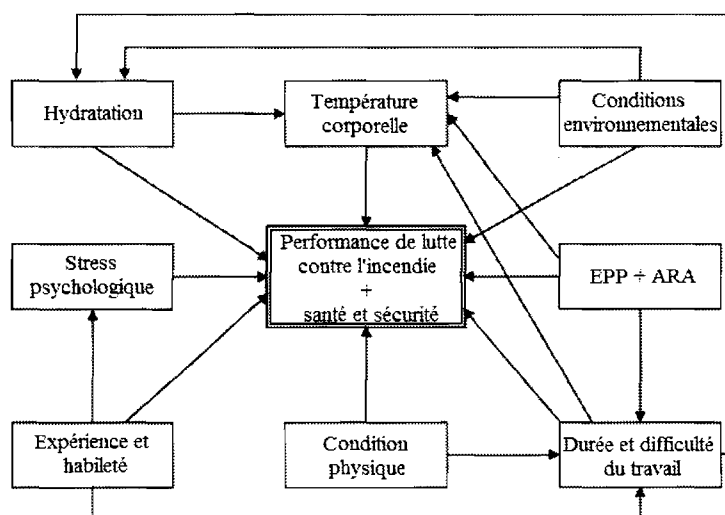


Figure 2-1. Schéma des facteurs principaux influençant la performance des pompiers (Adapté de Eglin et al. 2007).

Gledhill et Jamnik (1992) observent aussi que l'agilité, l'équilibre, la dextérité manuelle et la flexibilité sont des qualités nécessaires à la réalisation des tâches spécifiques aux pompiers. De plus, von Heimburg et al. (2006) considèrent que les tâches demandant de porter de l'équipement, de tirer ou de lever un objet exigent différentes techniques qui rendent le pompier plus économe à l'effort. Donc, il est à noter que plus un pompier est expérimenté et utilise de bonnes techniques de travail, moins le travail sera exigeant physiquement. Bref, une bonne compréhension des facteurs contribuant à une plus grande efficacité des pompiers au travail est essentielle.

PROBLÉMATIQUE

Les études qui avaient comme objectif d'analyser les exigences physiques du métier de pompier confirment que plusieurs qualités physiques et physiologiques doivent être présentes pour réaliser les tâches du métier de façon efficace et sécuritaire. En général, tous s'accordent pour affirmer que les pompiers se doivent de maintenir une bonne condition physique. Selon le ministère des Ressources humaines et Développement des compétences du Canada, s'entraîner constitue une des tâches du métier de pompier. Une étude mentionne qu'environ seulement 50% des pompiers font du sport dans leur temps libre de façon régulière (Bugajska et al. 2007). De plus, des auteurs observent que la plupart des pompiers surestiment leur condition physique (Barr, Gregson et Reilly 2010). Pourtant, cette profession est physiquement exigeante.

La condition physique est donc un facteur important pour accomplir les tâches du métier de pompier. L'objectif est surtout de les réaliser le plus efficacement et le plus économiquement possible en ventilant le moins d'air possible pour une intensité de travail donnée, car le temps d'une intervention dans le feu dépend fréquemment de la capacité du réservoir d'air porté par le pompier. L'économie d'air pourrait prolonger l'intervention du pompier et même lui permettre de terminer une tâche cruciale. Il est

probable qu'une condition physique supérieure engendre une meilleure économie d'air pour une intensité de travail donnée. Cette économie d'air pourrait prolonger l'intervention du pompier avec un même réservoir pour qu'il puisse terminer une tâche cruciale en situation réelle. Le fait de ne pas avoir une bonne condition physique pourrait exiger une plus grande ventilation d'air du réservoir pour l'accomplissement du test en un même temps de réalisation.

Dreger et Petersen (2007) affirment que, pour réussir le test de Deakin et al. (1996) en 8 minutes, le standard de réussite, le pompier doit être capable de maintenir la charge moyenne de 10 METS tout au long du test. Ainsi, une étude comparant la performance à un test simulant les tâches de la profession (SWC), avec le temps pour ventiler des quantités d'air prédéterminées dans le réservoir lors d'un test sur tapis roulant à une charge de 10 METS, sera pertinente. Elle contribuera à déterminer si les pompiers les plus performants à un test semblable au test de Deakin et al. (1996) simulant les tâches du métier de pompier (SWC) sont aussi les plus métaboliquement économes. Cette intensité sera identifiée pour chaque candidat à l'aide d'un test à effort maximal sur tapis roulant. De plus, il sera pertinent d'évaluer si la performance à un SWC est reliée à différents paramètres physiologiques centraux ou périphériques.

HYPOTHÈSES

La première hypothèse est qu'un pompier plus performant au SWC est aussi plus économe et ventile moins rapidement l'air dans son réservoir à 10 METS sur tapis roulant.

La deuxième hypothèse est qu'un pompier plus performant au SWC atteint une intensité plus élevée lors d'un test progressif à effort maximal jusqu'à épuisement sur tapis roulant.

La troisième hypothèse est que la performance au SWC est corrélée avec la capacité à extraire l'oxygène musculaire (HbO_2 , HHb, THb, HbDiff et TSI%).

La quatrième hypothèse est que la performance au test du SWC est corrélée avec la capacité cardiovasculaire (VO_2 , VE, VE/VO_2 , FC et le QR) à différentes intensités sous-maximales.

ARTICLE

**Greater physical fitness is associated with air ventilation efficiency in
firefighters**

Philippe Gendron, Eduardo Freiburger, Louis Laurencelle, François Trudeau and
Claude Lajoie*

Département des sciences de l'activité physique, Université du Québec à Trois-Rivières,
Trois-Rivières, QC, Canada, G9A 5H7

*corresponding author

L'article a été soumis dans *Applied Ergonomics* le 25 juin 2014

ABSTRACT

Firefighting is a hazardous task requiring heavy workload and may be limited by air cylinder capacity. It is likely that increased fitness lead to better oxygen economy and duration at a given heavy work intensity. This study compared a maximal graded walking test (GWT) to a 10 METS treadmill test (T10) and a simulated work circuit (SWC) on performance, pulmonary air ventilation and skeletal muscle oxygen extraction (difference of concentration of hemoglobin, HbDiff). Participants (N=13 professional firefighters) who performed the SWC in less time were those having lower pulmonary air ventilation values in their air cylinder at the T10 ($r = -0.495$, $P < 0.05$). Performances at the SWC were correlated with skeletal muscle oxygen extraction (HbDiff, $r = 0.767$, $P < 0.01$). These results demonstrated that the fastest participants at the SWC obtained lower pulmonary air ventilation values at a given work intensity and extracted more oxygen in skeletal muscle.

INTRODUCTION

Firefighting task in emergency conditions imposes high physiological and psychological demands. Unlike many other professions, the unpredictability of the workload demand during an intervention makes it impossible to plan, a situation that makes the job chancy and potentially hazardous. Generally, the firefighter who possesses good physical capacity will use a different and possibly more economic technique for a given task (von Heimburg et al. 2006). Thus, by maintaining an optimal level of fitness, one should reduce the physiological demand of the task, which in turn

may improve the safety of citizens, the firefighter himself and his teammates. According to the *United States Fire Administration (USFA)*, 50 and 45 firefighters died in 2011 and 2012 respectively from stress/overexertion, including 48 and 39 from heart attacks, the most frequent cause of death. Several studies have demonstrated that the tasks of firefighting require high energy expenditure, which under certain conditions approach the maximum individual physical capacity (Baker et al. 2000; Bos et al. 2004; Gledhill and Jamnik 1992). Michaelides et al. (2011) pointed out that fitness represents a significant portion (60%) of the outcome score in an ability test covering specific skills of firefighting. It has been shown that various physical and physiological qualities are required to perform adequately during firefighting. Firefighting tasks are highly associated with muscle strength and endurance (Dreger and Petersen 2007; Gledhill and Jamnik 1992; Harvey et al. 2008; Henderson et al. 2007; Michaelides et al. 2011; Rhea et al. 2004; Sheaff et al. 2010; Williford et al. 1999), aerobic metabolism (Perroni et al. 2010) and anaerobic metabolism (Dreger and Petersen 2007; Gledhill and Jamnik 1992; Michaelides et al. 2011; Rhea et al. 2004; Sheaff et al. 2010; Williford et al. 1999). Moreover, wearing the self-contained breathing apparatus (SCBA) on top of the fire protective clothing increases the physical demands of the occupation (Baker et al. 2000; Dreger et al. 2006; Eves et al. 2005; Louhevaara et al. 1995). Finally, the extreme heat of the fire situation makes firefighting more physically demanding (Bruce-Low et al. 2007; Petruzzello et al. 2009; Smith et al. 1997).

As can be expected, physical fitness is important to perform the duties and meeting the physical demands of firefighting. The firefighter's objective is primarily to perform as efficiently and economically as possible while ventilating the least amount of air at a given work intensity, because the autonomy time of intervention in the fire frequently depends on the capacity of the air cylinder. It is likely that increased physical fitness can lead to better air ventilation efficiency at a given work intensity, hence to a longer autonomy, reducing somewhat the physiological pressure imposed on the firefighters and possibly allowing them to complete a critical task.

The purpose of this study was threefold: 1-Verify if the fastest firefighters during a simulated work circuit (SWC) are those who consume less air at a given workload intensity, 2-Determine whether the fastest firefighters during a SWC are those who performed better at a maximal graded walking test (GWT) up to exhaustion, and 3-Find the central or peripheral physiological parameters, if any, who better correlate with performance at a SWC.

MATERIALS AND METHODS

Participants

Thirteen male firefighters took part in this study (age 28.4 ± 5.1 years; height 175.5 ± 4.5 cm; weight 84.4 ± 9.0 kg; $\text{VO}_{2\text{peak}}$ $47.8 \pm 5.1 \text{ mlO}_2 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$). Participants completed a physical activity readiness questionnaire (PAR-Q) helping us to identify their(s) risk factor(s) of any health problem facing the practice of physical activity.

Firefighters found at *moderate* or *high* risk of cardiovascular, pulmonary or metabolic disease, according to criteria of the American College of Sports Medicine (ACSM), were excluded from the study: note that participants should not be older than 44 years to meet the criteria of the ACSM. Moreover, participants were asked not to practice any intense physical activity during the 48 hours preceding each test. They were asked to refrain from consuming tobacco, caffeine, alcohol or drugs 24 h before the test. The study was approved by the UQTR research ethics committee. Finally, all participants had already taken part in this type of test in the gym during their training and/or hiring process

Experimental design

All participants completed the following tests while wearing firefighting protective clothing and carrying the self-contained breathing apparatus (SCBA) and air cylinder:

- 1- Maximal graded walking test (GWT) for measuring different physiological parameters while connected to a metabolic system;
- 2- 10 METS treadmill test (T10) designed to measure the time to ventilate air from the air cylinder at the intensity of 10 METS, an average intensity needed to complete the fire fit test work simulation described by Deakin et al. (1996) inside 8 min (Dreger and Peterson 2007);
- 3- Simulated firefighter work circuit (SWC) used to measure the time to perform at a test mimicking different tasks of firefighting while carrying protective clothing and

breathing with the SCBA. Participants performed the SWC as quickly as possible, while respecting regulations of the test protocol.

The height of each participant was measured before the first testing day, whereas the weight and fat percentage (Tanita, Body Composition Analyzer BF-350, Japan) were measured at each testing day. All three tests were administered in a laboratory or in a sport gym where the ambient temperature was maintained at 21°C.

Firefighting protective equipment (FPE)

During each test, participants were dressed with firefighting bunker gear (Honeywell, Morristown, NJ), leather firefighting boots (STC Marshall 22014, Montreal, QC) or rubber firefighting boots (Acton FirePro, Quebec, QC), work gloves (DragonFire, Chesterfield, VA) and a hood (PGI Inc., Green Lake, WI). In addition, participants used SCBA (MSA Firehawk M7 4500, Cranberry, PA) and air cylinder (MSA Firehawk M7 4500, Cranberry, PA) for all three tests, except for the GWT because oxygen consumption was measured. Participants also wore a helmet (Bullard Firedome serie, Cynthiana, KY) and a mask (MSA Firehawk M7, Cranberry, PA) for the T10 and the SWC. The mean total mass of the firefighting protective equipment was 22.5 ± 0.75 kg for the GWT and 25.1 ± 0.70 kg for the T10 and the SWC.

Maximal graded walking test (GWT)

Peak oxygen consumption and different submaximal and maximal physiological parameters were measured during the maximal graded walking test on a treadmill (Model 643, Quinton instruments, Seattle, WA). The walking speed (5 km/h) was the same during the duration of the test to avoid running. After 2 minutes of warm up at 0% grade, grade was increased by 2% at each bout of 2 minutes up to exhaustion.

10 METS treadmill test (T10)

This test was used to measure air ventilation from the air cylinder at an intensity of 10 METS ($35 \text{ mlO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) on an inclined treadmill: the percentage of incline was determined by interpolation using the GWT data. The intensity of 10 METS was reported as being the average VO_2 in work associated with completion of the fire fit test work simulation described by Deakin et al. (1996) at the specified performance standard of 8 minutes (Dreger and Petersen 2007). More specifically, each participant had to walk on the treadmill up to a 3000 psi air pressure decrease in the air cylinder. Firefighters who were not able to expend 3000 psi had to walk up to exhaustion.

Simulated firefighting work circuit (SWC)

The SWC is a circuit simulating closely the variety and workload demands of firefighting. The circuit was similar to the fire fit test described by Deakin et al. (1996). More specifically, the test was composed of ten different tasks executed one after the other without interruption. Between each of these, the participant walks towards the next

station according to predetermined distances. Participants had to complete the circuit in the shortest time possible without running. The test was performed on a hardwood floor.

1. *Hose carry*: participant carries a bucket equivalent to one section of rolled 65 mm hose weighing 16.5 kg in one hand on a distance of 15.24 m, and comes back for the same distance, carrying the bucket in the other hand. Participant then walks 15.24 m to the next event (W1).

2. *Ladder raise*: participant picks up a ladder (13.6 kg) from the floor, carries it on a distance of 15.24 m and raises it against a brick wall. Participant then walks 15.24 m to the next event (W2).

3. *Hose drag*: participant drags two iron plates of 20 kg each placed on a 38 mm coiled hose section of 30.48 m on a distance of 26.00 m. Participant then walks 15.24 m to the next event (W3).

4. *Ladder climb 1*: using a 7.2 m ladder, participant climbs 10 rungs (3.45 m) up and down, 3 times. Participant then walks 30.48 m to the next event (W4).

5. *High volume hose pull*: while standing in a stationary position, participant pulls on a rope attached to a bundle of hoses (one 30.48 m length of 100 mm hose and one 15.24 m length of 65 mm hose) for a distance of 15.24 m using a hand-over-hand movement. Participant then walks 15.24 m and recommences the pull. Participant then walks 15.24 m to the next event (W5).

6. *Forcible entry*: using a 4.5 kg steel-head sledge hammer, participant hammers sideways on a rubber truck tire filled with sandbags (total weight 102.5 kg) to push it on

a distance of 30.5 cm on a 76.2 cm high table. Participant then walks 15.24 m to the next event (W6).

7. *Victim rescue*: walking backwards, participant drags a 68.2 kg dummy ('Rescue Randy') on a total distance of 30.48 m (15.24 one way, touch a line, and back 15.24 m) with a strap under the armpits. Participant then walks 15.24 m to the next event (W7).

8. *Ladder climb 2*: using a 7.2 m ladder, participant climbs 10 rungs (3.45 m) up and down, twice. Participant then walks 30.48 m to the next event (W8).

9. *Ladder lower*: participant lowers the ladder from where it was previously erected, and carries it on a distance of 15.24 m (W9).

10. *Spreader tool carry*: participant picks up and carries an 18.2 kg spreader tool in each hand on a total distance of 30.48 m (15.24 one way, touch a line, and back 15.24 m).

Physiological measurements

On their first visit to the laboratory, participants were tested to measure their peak oxygen uptake ($\text{VO}_{2\text{peak}}$). Ventilation and pulmonary gas exchange (VO_2 , VCO_2 , V_E , V_E/VO_2 , RER) were measured using a gas analyzer apparatus (Moxus, AEI Technologies, Pittsburgh, PA). Each participant wore a Hans Rudolph 2700 series body style saliva trap 2-way NRBV mask (Kansas city, MO) and a head support for Rudolph valves series 2726 (P/N 112151). Prior to the test, the device was calibrated according to the manufacturer's instructions using 4 different gases of known concentrations. Flow volume was calibrated with a 3.00 L Hans Rudolph 5530 series calibration syringe

(Kansas City, MO). In all tests, participants wore a Polar telemetry system (RS800CX, Polar, Finland) which continuously measured and recorded heart rate at 5 second intervals during exercise. Data were analyzed using the Polar ProTrainer 5 software. Participants also wore a portable Near Infrared Spectrophotometer, NIRS (Portamon, Artinis Medical system BV, Netherlands) in all tests to measure oxyhemoglobin (HbO₂), deoxyhemoglobin (HHb), total hemoglobin (THb), difference of concentration of hemoglobin (HbDiff) and tissue saturation index (TSI%). Furthermore, lactatemia was measured with a lactate analyzer (Lactate Pro LT-1710, USA) during and after exercise.

Near infrared spectroscopy (NIRS)

Muscle oxygenation was measured in the *vastus lateralis* since the lower limbs are always involved during the several tasks of firefighting. It was evaluated with NIRS, which is a non-invasive method that monitors local muscle oxy/deoxygenation. The method is based on the relative tissue transparency to light in the near-infrared region and the oxygen-dependent absorption changes of hemoglobin and myoglobin. These signals were zeroed during resting baseline and reported as a relative difference in concentration during exercise. This was done while the participant was seated on a chair with feet on the ground, legs in a relaxed position at an approximately right angle. A setting time of 120 seconds was allowed at each test to allow for signal stabilization before the baseline of 60 seconds was recorded. The NIRS was installed on the *vastus lateralis* muscle at approximately 40% of the distance from the patella to the great trochanter.

Statistical analysis

All data are presented as mean $\pm$ SD. Pearson correlations were determined for specific relationships. Kendall's rank correlation coefficients (τ , "tau") were computed between levels of air pressure decrease and Pearson coefficients linking performance time and time to ventilate up to corresponding PSI decrease. Kendall's rank correlation coefficients were also computed between grades of treadmill at GWT and various Pearson coefficients linking performance time and some physiological parameters. Statistical significance was accepted for $P < 0.05$.

RESULTS

Participants' characteristics

Descriptive physiological characteristics and anthropometric measurements of the 13 participants are shown in Table 6-1.

Table 6-1. Descriptive data of participants

Variable	Total group (n=13)
Age (years)	28.4 $\pm$ 5.1
Height (cm)	175.5 $\pm$ 4.5
Weight (kg)	84.4 $\pm$ 9.0
Fat percentage	21.9 $\pm$ 4.1
BMI (kg/m ²)	27.4 $\pm$ 2.9
VO ₂ peak (mlO ₂ ·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	47.8 $\pm$ 5.1
SWC completion time (s)	353 $\pm$ 30

Data are mean $\pm$ SD. BMI: Body mass index, VO₂peak: peak oxygen uptake during the GWT.

Maximal graded walking test versus simulated work circuit

Firefighters who completed the SWC in less time also performed longer until exhaustion at the GWT ($r = -0.789$; $P < 0.001$). Indeed, participants who had higher $\text{VO}_{2\text{peak}}$ ($\text{mlO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) were those who completed the SWC in less time ($r = -0.924$; $P < 0.001$).

Performance versus air ventilation efficiency

Only 9 participants were able to ventilate air up to a 3000 psi air pressure decrease in the air cylinder during T10. Therefore, for the purpose of comparisons, we took the time reached to ventilate air at the highest common value ($n=13$) of air pressure decrease, which was 1850 psi. Firefighters who completed the SWC in less time were the slower to reach 1850 psi during T10 (Fig. 6-1) and those who had a greater $\text{VO}_{2\text{peak}}$ were also the slower to reach 1850 psi during T10 (Fig. 6-2). In Table 6-2, correlations between SWC completion time, $\text{VO}_{2\text{peak}}$ and different time to ventilate air to different pressure decreases at T10 are shown. Moreover, participants who completed the SWC in less time were those who ventilated less air from the air cylinder in the first 8 minutes during T10 ($r = 0.489$; $P < 0.05$). There is also a relation between $\text{VO}_{2\text{peak}}$ and the quantity of ventilated air from the air cylinder in the first 8 minutes during the T10 ($r = -0.579$; $P < 0.05$). Weight was also strongly correlated with the time to ventilate air up to 1850 psi ($r = -0.715$, $P < 0.01$).

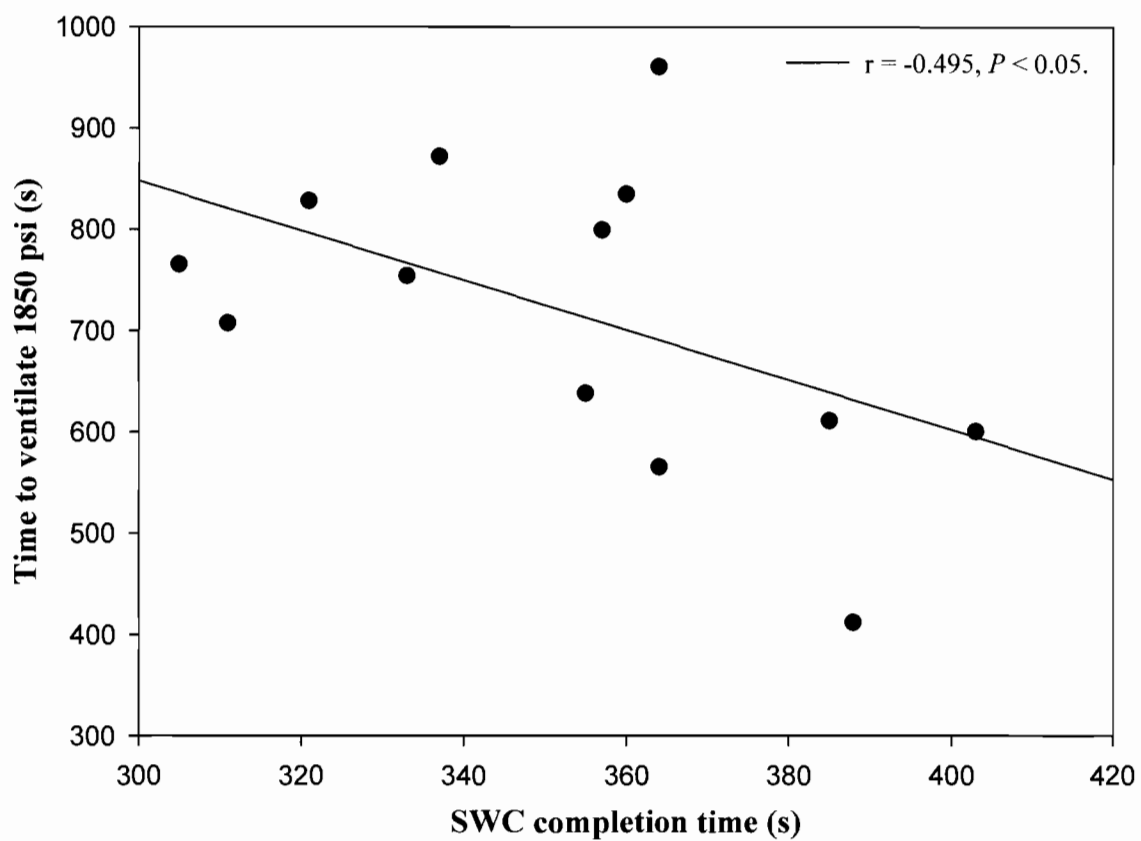


Figure 6-1. Relationship between time to ventilate 1850 psi from air cylinder at 10 METS and SWC completion time.

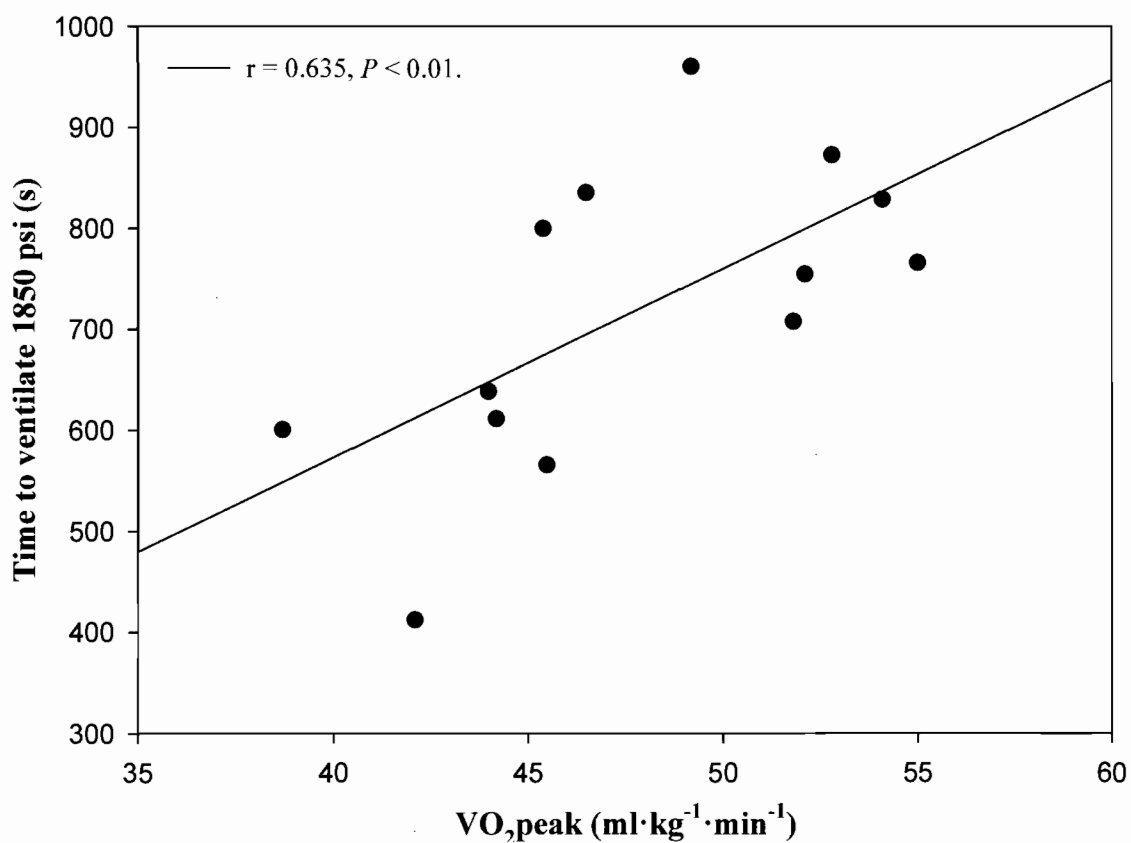


Figure 6-2. Relationship between time to ventilate 1850 psi from air cylinder at 10 METS and VO_{2peak} .



Table 6-2. Pearson correlations between time to ventilate air (for different air pressure decreases) and SWC completion time and VO₂peak

PSI	500	1000	1500	2000	2500	3000	Global τ
N	13	13	13	11	10	9	
SWC	-0.339	-0.397	-0.454	-0.458	-0.667*	-0.740*	1.000**
VO ₂ peak	0.460	0.530*	0.593*	0.614**	0.718**	0.825**	1.000**

PSI: air pressure decrease (psi) at T10. VO₂peak: peak oxygen consumption. *Significant at $P < 0.05$.

**Significant at $P < 0.01$.

Performance, air ventilation efficiency and physiological response

In Table 6-3, correlations between SWC completion time and selected physiological variables in different grades of the GWT are shown. Correlations between VO₂peak and selected physiological variables in different grades of the GWT are displayed in Table 6-4. No significant correlation was observed between SWC completion time and muscle oxygenation parameters ([HbO₂], [HHb], [THb], [HbDiff] and TSI%) during different grades of the GWT, nor between VO₂peak and muscle oxygenation parameters during different grades of the GWT. Finally, during the SWC, participants reached a mean HR of 91.4% and a maximal HR of 94.4% of their maximal heart rate.

Table 6-3. Pearson correlations between SWC completion time and different physiological parameters in different grades of the GWT

	SWC completion time						Global τ
	Grade (%)						
	2	4	6	8	10	12	
RER	0.341	0.406	0.599*	0.613*	0.717**	0.653*	0.867*
V_E/VO₂	0.258	0.237	0.312	0.442	0.657**	0.734**	0.867*
V_E	0.117	0.157	0.232	0.392	0.484*	0.440	0.867*
%HR_{max}	0.259	0.429	0.508*	0.758**	0.761**	0.692**	0.733*

RER: respiratory exchange ratio, V_E/VO₂: ventilatory equivalent ratio for oxygen, V_E: ventilation, HR: heart rate. *Significant at $P < 0.05$. **Significant at $P < 0.01$.

Table 6-4. Pearson correlations between $\text{VO}_{2\text{peak}}$ and different physiological parameters in different grades of the GWT

	VO ₂ peak						
	Grade (%)						Global τ
	2	4	6	8	10	12	
RER	-0.412	-0.513*	-0.576*	-0.665**	-0.724**	-0.728**	1.000**
V _E /VO ₂	-0.369	-0.344	-0.288	-0.536*	-0.624*	-0.790**	-0.600
V _E	-0.271	-0.271	-0.252	-0.483*	-0.472	-0.523*	-0.552
%HR _{max}	-0.095	-0.302	-0.331	-0.700**	-0.721**	-0.716**	-0.867*

RER: respiratory exchange ratio, V_E/VO_2 : ventilatory equivalent ratio for oxygen, V_E : ventilation, HR: heart rate. $\text{VO}_{2\text{peak}}$: peak oxygen consumption. *Significant at $P < 0.05$. **Significant at $P < 0.01$.

Skeletal muscle oxygenation during the SWC

Values for selected physiological variables are displayed for each task of the SWC in figure 6-1. Moreover, SWC completion time and $\text{VO}_{2\text{peak}}$ were correlated with skeletal muscle oxygenation (Table 6-5 and Table 6-6).

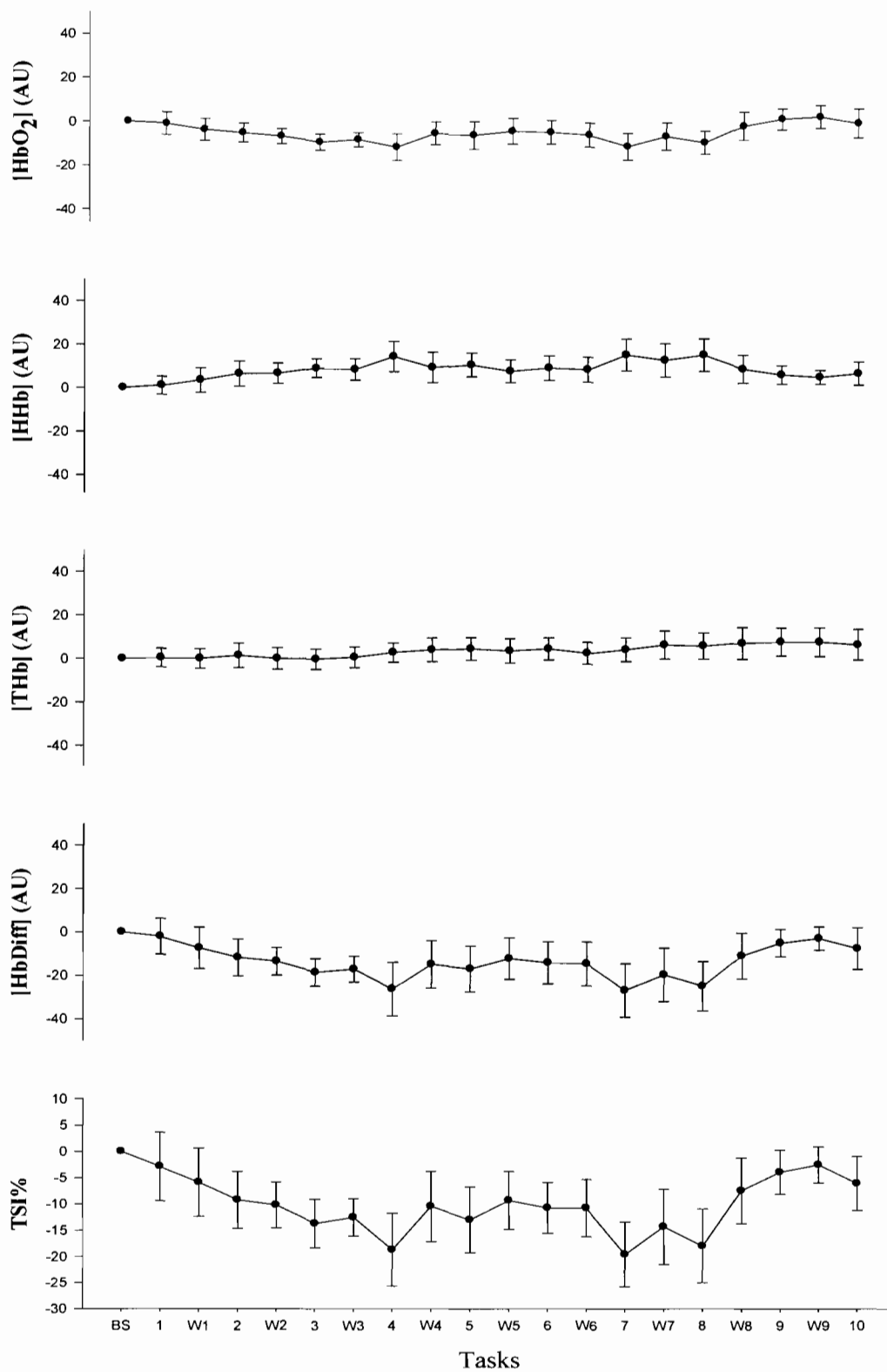


Figure 6-3. [HbO₂], [HHb], [THb], [HbDiff] and TSI% are shown during each task of the SWC. AU: arbitrary units. Number 1 to 10: Tasks in order. W + Number: Walk to the next event. Values are mean $\pm$ SD. Values were adjusted from baseline (BS).

Table 6-5. Pearson correlations between SWC completion time and muscle oxygenation parameters during SWC

	SWC completion time	
	Max	Mean
[HbO₂]	0.781**	0.676**
[HHb]	-0.542*	-0.593*
[THb]	0.411	0.486*
[HbDiff]	0.725**	0.768**
TSI%	0.617*	0.604*

[HbO₂]: skeletal muscle oxyhemoglobin, [HHb]: skeletal muscle deoxyhemoglobin, [THb]: skeletal muscle total hemoglobin, [HbDiff]: difference of concentration of hemoglobin, TSI%: skeletal muscle tissue saturation index. Values were adjusted from baseline. *Significant at $P < 0.05$. **Significant at $P < 0.01$.

Table 6-6. Pearson correlations between VO_2peak achieved during the GWT and muscle oxygenation parameters during SWC

	VO_2peak	
	Max	Mean
[HbO ₂]	-0.742**	-0.762**
[HHb]	0.394	0.456
[THb]	-0.283	-0.206
[HbDiff]	-0.634**	-0.728**
TSI%	-0.399	-0.369

[HbO₂]: skeletal muscle oxyhemoglobin, [HHb]: skeletal muscle deoxyhemoglobin, [THb]: skeletal muscle total hemoglobin, [HbDiff]: difference of concentration of hemoglobin, TSI%: skeletal muscle tissue saturation index. Values were adjusted from baseline. *Significant at $P < 0.05$. **Significant at $P < 0.01$.

DISCUSSION

Performance and air ventilation efficiency

The principal original finding of this investigation was that firefighters who completed the SWC in less time took significantly more time to ventilate air from their cylinder up to a decrease of air pressure of 1850, 2500 and 3000 psi in their air cylinder. Moreover, this relation kept strengthening as effort duration increased. This strongly suggests that, the more a firefighting intervention in the field will last, the more physical

fitness will be an asset for performance, through its mediating effect on air ventilation efficiency. Moreover, we observed that a faster performance at the SWC was also correlated with a longer time until exhaustion during GWT and a better relative VO_2peak . Taken together, greater aerobic fitness was associated with greater air ventilation efficiency of faster firefighters in the SWC. Accordingly to Holmer and Gavhed (2007), cardiovascular strain is lower in individuals with a higher maximal aerobic capacity for a given submaximal intensity. Therefore, we can hypothesize that the air cylinder supply duration will, for a given workload, be greater for the fittest firefighters during a real intervention. This could be very important when time to complete a critical task becomes.

We also examined physiologic changes during submaximal workloads of the GWT (Table 6-3 and 6-4). Systemic physiological parameters were correlated with firefighters' performance and VO_2peak . Consistent with our expectations, participants who completed the SWC more rapidly and reached a higher VO_2peak had lower V_E , lower V_E/VO_2 , and a lower RER values during submaximal workload of the GWT. Firstly, if V_E was lower for a given grade during GWT, we surmise that the air ventilation from an air cylinder would also have been lower. Secondly, a lower V_E/VO_2 could be beneficial for the firefighter because, for a given quantity of oxygen consumed, less air ventilation would be needed and this may preserve air in the cylinder. Martin et al. (1979) found that non-athletes had greater exercise V_E/VO_2 and greater respiratory response to O_2 when compared with endurance athletes at equal relative workloads. This

also shows that greater aerobic physical fitness leads to a better air ventilation efficiency from the air cylinder for a given work intensity and for a comparable oxygen demand. Also, firefighters who completed the SWC in less time demonstrated a lower RER during the GWT suggesting that the anaerobic contribution to energy release was lower. Goedecke et al. (2000) found that, during different exercise intensities at 25-50-70% of peak power output, circulating plasma lactate concentration was significantly correlated with RER, suggesting that anaerobic contribution was lower. This in turn suggests that participants who completed the SWC more rapidly and had a better $\text{VO}_{2\text{peak}}$ had lower plasma lactate concentration values for some steps during the GWT. Then, for a given intensity, energy release from anaerobic process is lower. Moreover, we presume that fatigue is lessened and exhaustion delayed. Finally, Kendall's rank correlation coefficients (Table 6-3 and 6-4) point to the fact that the higher the submaximal intensity, the higher the significance of the correlation between measured parameters (RER, V_E/VO_2 , V_E , V_E/kg , %HRmax).

This study showed that a higher fitness level is a strong factor helping to ventilate less air from the air cylinder. Also, larger body weight was associated with less air ventilation efficiency, since in that case air pressure decreased more rapidly during the T10. This is in accordance with Cotes (1969) who found that oxygen uptake and ventilation are linear functions of body weight in normal males during submaximal exercise. Conversely, despite the fact that body weight was positively correlated with air ventilation, we still observed some positive correlation between $\text{VO}_{2\text{peak}}$ and elapsed

time to ventilate air in the air cylinder during the T10. Actually, these findings suggest that firefighters with greater body weight and in better physical fitness were more efficient in air ventilation than smaller firefighters with lesser fitness. The partial correlation coefficient between $\text{VO}_{2\text{peak}}$ and time to ventilate 1850 psi controlling for participant's weight was $r = 0.539$ ($P < 0.05$).

Skeletal muscle oxygenation

In this study, firefighters' performance at the SWC and $\text{VO}_{2\text{peak}}$ value achieved at the GWT were correlated to several skeletal muscle oxygenation variables. The decline rate of muscle oxygenation during the SWC was significantly correlated to SWC completion time (Table 6-5): firefighters who completed the SWC in less time showed greater O_2 extraction in the *vastus lateralis* muscle. This suggests that participants with greater systemic oxygen uptake during the SWC were the fastest. Kawaguchi et al. (2001) reported that the kinetics of peripheral muscle oxygenation may reflect systemic oxygen uptake. Actually, many studies also reported that *vastus lateralis* muscle oxygenation was correlated with whole body O_2 consumption (Bailey et al. 2009; Bhamhani et al. 1998; Demarie et al. 2001; Hiroyuki et al. 2002; Im et al. 2001; Miura et al. 2000). Greater localized muscular factors such as capillarization, oxidative enzyme activity and mitochondrial density may have contributed to this higher O_2 extraction/utilization. Finally, participants with higher $\text{VO}_{2\text{peak}}$ extracted/utilized more oxygen in the *vastus lateralis* during the SWC (Table 6-6). Bae et al. (2000) also reported a correlation between $\text{VO}_{2\text{max}}$ and decline in muscle oxygenation during

intermittent bouts of exercise (10 sec work: 20 sec recovery) at maximal power output over 15 minutes. This relation suggests that a better aerobic fitness enhances oxygen extraction in the *vastus lateralis* muscle during an exercise where the aerobic process of energy production is solicited.

Finally, ladder climbing (Task number 4 and 8 in Fig 1.) and victim drag (Task number 7 in Fig 1.) during the SWC generated a greater physiological stress, as shown by higher heart rates and muscle deoxygenation in the *vastus lateralis* muscle. Firefighters reached 94.1% of their maximal heart rate during ladder climbing and victim drag. The higher heart rate reflected a greater central physiological demand during these tasks. In terms of muscle oxygenation, Miura et al. (2000) found that oxygenated hemoglobin/myoglobin concentration measured with NIRS in the *vastus lateralis* muscle reflected muscle activity and lactic acidosis. This suggests that ladder climbing and victim drag may be the most demanding tasks for lower limbs during the SWC.

CONCLUSION

According to this study, the best performances at SWC were associated with a lower pulmonary air ventilation at a given heavy work intensity. An increased air ventilation efficiency could allow firefighters with a greater fitness to perform longer in difficult situations requiring use of an air cylinder. Furthermore, individuals with a better SWC performance also achieved longer performances at the GWT. A better

VO₂peak and a better oxygen extraction rate in the skeletal muscle correlated also positively with a better performance at the SWC.

PRACTICAL IMPLICATIONS

This research strived to contribute to the physiological analysis of firefighting and to make up for a lack thereof in the scientific literature. To our knowledge, no study evaluated air ventilation efficiency of firefighters using SCBA and air cylinder during. This research should help to analyze the results of simulated work circuits mimicking the tasks of firefighting. We now know that firefighters performing the SWC in less time are saving more air at the same work intensity. This could help prolong an exacting intervention in a fire. Finally, regardless of their physical condition, this study also demonstrated that individuals of smaller size (body weight) ventilate less air in the air cylinder during different exercise intensities while wearing the firefighting protective equipment. It thus suggests that every firefighter may not need the same amount of air and, by this very fact, may use an air cylinder of appropriate size for the same period of time during an intervention. Moreover, it's more difficult to bear the weight of firefighting protective equipment for an individual of smaller size (the cylinder is relatively heavier vs. their body mass). Louhevaara et al. (1995) observed that robust build is an important individual characteristic predicting the smallest drop in maximal power output with the firefighting protective equipment in demanding dynamic work. A proportionate size of air cylinder for each individual may facilitate the tasks of firefighters of smaller size, including the majority of women.

REFERENCES

- Bae SY, Hamaoka TK, Katsumura T, Shiga T, Ohno H and Haga S (2000). Comparison of muscle oxygen consumption measured by near infrared continuous wave spectroscopy during supramaximal and intermittent pedalling exercise. *Int. J. Sports Med*, 21(3), 168-174.
- Bailey SJ, Wilkerson DP, Dimenna FJ & Jones AM (2009). Influence of repeated sprint training on pulmonary O₂ uptake and muscle deoxygenation kinetics in humans. *Journal of Applied Physiology*, 106(6), 1875-1887.
- Baker SJ, Grice J, Roby L & Matthews C (2000). Cardiorespiratory and thermoregulatory response of working in fire-fighter protective clothing in a temperate environment. *Ergonomics*, 43(9), 1350-1358.
- Bhambhani Y, Maikala R & Buckley S (1998). Muscle oxygenation during incremental arm and leg exercise in men and women. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 78(5), 422-431.
- Bos J, Mol E, Visser B & Frings-Dresen M (2004). The physical demands upon (Dutch) fire-fighters in relation to the maximum acceptable energetic workload. *Ergonomics*, 47(4), 446-460.

Bruce-Low SS, Cotterrell D & Jones GE (2007). Effect of wearing personal protective clothing and self-contained breathing apparatus on heart rate, temperature and oxygen consumption during stepping exercise and live fire training exercises. *Ergonomics*, 50(1), 80-98.

Cotes JE (1969). Relationships of oxygen consumption, ventilation and cardiac frequency to body weight during standardized submaximal exercise in normal subjects. *Ergonomics*, 12(3), 415-427.

Deakin JM, Pelot RP, Smith JM, Stevenson JM, Wolfe LA, Lee SW, von Heimburg E, Rasmussen AK, Medbo JI (2006). *Development of a bona fide physical maintenance standard for CF and DND fire fighters*: 1-120. Queen's University, Kingston, Ont.

Demarie S, Quaresima V, Ferrari M, Sardella F, Billat V & Faina M (2001). VO₂ slow component correlates with vastus lateralis de-oxygenation and blood lactate accumulation during running. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 41(4), 448-455.

Dreger RW, Jones RL & Petersen SR (2006). Effects of the self-contained breathing apparatus and fire protective clothing on maximal oxygen uptake. *Ergonomics*, 49(10), 911-920.

Dreger RW & Petersen SR (2007). Oxygen cost of the CF-DND fire fit test in males and females. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 32(3), 454-462.

Eves ND, Jones RL & Petersen SR (2005). The influence of the self-contained breathing apparatus (SCBA) on ventilatory function and maximal exercise. *Canadian Journal of Applied Physiology*, 30(5), 507-519.

Gledhill N & Jamnik VK (1992). Characterization of the physical demands of firefighting. *Canadian journal of sport sciences*, 17(3), 207-213.

Goedecke JH, St Clair Gibson A, Grobler L, Collins M, Noakes TD & Lambert EV (2000). Determinants of the variability in respiratory exchange ratio at rest and during exercise in trained athletes. *American Journal of Physiology. Endocrinology and Metabolism*, 279(6), E1325-E1334.

Harvey DG, Kraemer JL, Sharratt MT & Hughson RL (2008). Respiratory gas exchange and physiological demands during a fire fighter evaluation circuit in men and women. *European Journal of Applied Physiology*, 103(1), 89-98.

- Henderson ND, Berry MW & Matic T (2007). Field measures of strength and fitness predict firefighter performance on physically demanding tasks. *Personnel Psychology*, 60(2), 431-473.
- Hiroiyuki H, Hamaoka T, Sako T, Nishio S, Kime R, Murakami M & Katsumura T (2002). Oxygenation in vastus lateralis and lateral head of gastrocnemius during treadmill walking and running in humans. *European Journal of Applied Physiology*, 87(4-5), 343-349.
- Holmér I & Gavhed D (2007). Classification of metabolic and respiratory demands in fire fighting activity with extreme workloads. *Applied Ergonomics*, 38(1), 45-52.
- Im J, Nioka S, Chance B & Rundell KW (2001). Muscle oxygen desaturation is related to whole body VO_2 during cross-country ski skating. *International Journal of Sports Medicine*, 22(5), 356-360.
- Kawaguchi K, Tabusadani M, Sekikawa K, Hayashi Y & Onari K (2001). Do the kinetics of peripheral muscle oxygenation reflect systemic oxygen intake? *European Journal of Applied Physiology*, 84(1-2), 158-161.

- Louhevaara V, Ilmarinen R, Griefahn B, Künemund C & Mäkinen H (1995). Maximal physical work performance with European standard based fire-protective clothing system and equipment in relation to individual characteristics. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 71(2-3), 223-229.
- Martin BJ, Sparks KE, Zwillich CW & Weil JV (1979). Low exercise ventilation in endurance athletes. *Medicine and Science in Sports*, 11(2), 181-185.
- Michaelides MA, Parpa KM, Henry LJ, Thompson GB & Brown BS (2011). Assessment of physical fitness aspects and their relationship to firefighters' job abilities. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(4), 956-965.
- Miura H, Araki H, Matoba H & Kitagawa K (2000). Relationship among oxygenation, myoelectric activity, and lactic acid accumulation in vastus lateralis muscle during exercise with constant work rate. *International Journal of Sports Medicine*, 21(3), 180-184.
- Perroni F, Tessitore A, Cortis C, Lupo C, D'Artibale E, Cignitti L & Capranica L (2010). Energy cost and energy sources during a simulated firefighting activity. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(12), 3457-3463.

- Petruzzello SJ, Gapin JI, Snook E & Smith DL (2009). Perceptual and physiological heat strain: examination in firefighters in laboratory and field-based studies. *Ergonomics*, 52(6), 747-754.
- Rhea MR, Alvar BA & Gray R (2004). Physical fitness and job performance of firefighters. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 18(2), 348-352.
- Sheaff AK, Bennett A, Hanson ED, Kim Y-S, Hsu J, Shim JK, Hurley BF (2010). Physiological determinants of the candidate physical ability test in firefighters. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(11), 3112-3122.
- Smith DL, Petruzzello SJ, Kramer JM & Misner JE (1997). The effects of different thermal environments on the physiological and psychological responses of firefighters to a training drill. *Ergonomics*, 40(4), 500-510.
- Thompson WR, Gordon FN and Pescatello LS (2010). *ACSM's Guidelines for Exercise Testing and Prescription*. Lippincott Williams & Wilkins, Baltimore, Md., USA.
- United States Fire Administration (2011) Firefighter fatalities in the United States in 2012. http://www.usfa.fema.gov/downloads/pdf/publications/ff_fat11.pdf. 07-03-2014.

United States Fire Administration (2012) Firefighter fatalities in the United States in 2012. http://www.usfa.fema.gov/downloads/pdf/publications/ff_fat12.pdf. 07-03-2014.

von Heimburg ED, Rasmussen AKR & Medbo JI (2006). Physiological responses of firefighters and performance predictors during a simulated rescue of hospital patients. *Ergonomics*, 49(2), 111-126.

Williford HN, Duey WJ, Olson MS, Howard R & Wang N (1999). Relationship between fire fighting suppression tasks and physical fitness. *Ergonomics*, 42(9), 1179-1186.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif de cette étude était de vérifier les bienfaits d'une bonne condition physique sur la réalisation des tâches du métier de pompier. Ce projet de recherche nous a permis de constater que les meilleures performances à un test simulant les tâches du métier de pompier (SWC) sont associées à une ventilation d'air inférieure à une intensité de travail sous-maximale donnée. Cette meilleure économie d'air pourrait permettre aux pompiers de prolonger une intervention dans des situations difficiles exigeant le port de l'ARA et de l'EPP. De plus, on observe que les pompiers donnant une meilleure performance au SWC sont ceux qui ont performé le plus longtemps à un test progressif sur tapis roulant jusqu'à épuisement (GWT). Ils ont aussi atteint une meilleure consommation pic d'oxygène lors du GWT. Une puissance aérobie supérieure améliorerait la performance des pompiers à un test simulant les tâches de la profession. Enfin, on constate aussi que les pompiers avec un meilleur taux d'extraction/utilisation d'oxygène dans le muscle squelettique (vaste latéral) pendant le SWC ont réalisé ce test plus rapidement. Étant donné que le taux d'utilisation d'oxygène en périphérie représente la consommation d'oxygène systémique, on peut croire qu'une plus grande consommation d'oxygène systémique pendant le SWC est liée à une meilleure performance.

LIMITES, PERSPECTIVES ET RETOMBÉES

Malgré une certaine rigueur méthodologique, quelques limites doivent être rapportées. Premièrement, l'étude a été réalisée avec un échantillon de seulement 13 participants. De plus, le test de Deakin et al. (1996) sélectionné pour représenter les tâches du métier de pompier a dû être légèrement modifié (SWC). La tâche 3 (*Tirer le tuyau souple*) a été réalisée sur une distance de 26 mètres au lieu de 30 mètres (dimension du gymnase). La tâche 7 (*Tirer une victime*) a été exécutée à l'aide d'une sangle préalablement installée sous les aisselles du mannequin dans le but de standardiser la technique utilisée lors de cette tâche. Finalement, le test a été administré sur un plancher de bois au lieu d'une surface de béton, ce qui rend le test plus facile et plus rapide à réaliser. Sur la surface de bois, la résistance est moindre que sur la surface de béton lorsque des objets sont traînés au sol. Deuxièmement, aucune séance de familiarisation n'a été accordée en raison des diverses difficultés techniques concernant la disponibilité du matériel, du gymnase et des participants. Par contre, tous les participants avaient déjà pris part à ce type de test en gymnase lors de leur formation ou de leur processus d'embauche. Troisièmement, la ventilation d'air dans le réservoir du pompier n'a pas été mesurée lors d'une même intensité de travail, mais plutôt lors d'un même effort physiologique relatif (10 METS). Cette intensité a été rapportée scientifiquement comme étant l'intensité moyenne devant être soutenue lors du test de Deakin et al. (1996) pour le réaliser en 8 minutes. Par contre, lors d'une intervention en situation réelle, les pompiers doivent travailler à une même intensité de travail. Il serait

intéressant dans une nouvelle étude de mesurer la consommation d'air à une même intensité de travail.

Nonobstant les limites précédemment énumérées, ce projet de recherche apporte une contribution scientifique à l'analyse physiologique du métier de pompier et répond à une lacune identifiée dans la littérature scientifique. À notre connaissance, aucune étude n'a mesuré l'économie d'air dans le réservoir du pompier à l'effort. Pourtant, le réservoir d'air est un outil essentiel dans la réalisation de ses tâches. Ce projet de recherche aide à démontrer que les pompiers les plus rapides à un test simulant les tâches du métier de pompier ventilent moins d'air pour une même intensité de travail et peuvent donc prolonger une intervention avec une même quantité d'air dans leur réservoir. Finalement, indépendamment de la condition physique, cette étude démontre aussi que les individus de plus petit gabarit (taille et poids) ventilent moins d'air du réservoir à différentes intensités de travail tout en portant l'équipement de protection personnelle. Cela suggère que les pompiers ne nécessitent pas tous la même quantité d'air et, par ce fait même, la même grosseur de réservoir d'air pour une même durée d'intervention dans le feu. Il est important de noter qu'il est plus difficile de porter le poids de l'équipement de protection personnelle pour un individu de plus petit gabarit, le cylindre étant plus lourd relativement à leur poids corporel. Une dimension des réservoirs d'air mieux proportionnée à chacun des individus faciliterait la réalisation des tâches pour les pompiers physiquement moins imposants, notamment la majorité des femmes.

RÉFÉRENCES

- Abel MG, Mortara AJ & Pettitt RW (2011). Evaluation of circuit-training intensity for firefighters. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(10), 2895-2901.
- Adams TD (1986). A study to evaluate and promote total fitness among fire fighters. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 26(4), 337-345.
- Bae SY, Hamaoka TK, Katsumura T, Shiga T, Ohno H and Haga S (2000). Comparison of muscle oxygen consumption measured by near infrared continuous wave spectroscopy during supramaximal and intermittent pedalling exercise. *Int. J. Sports Med*, 21(3), 168-174.
- Bailey SJ, Wilkerson DP, Dimenna FJ & Jones AM (2009). Influence of repeated sprint training on pulmonary O₂ uptake and muscle deoxygenation kinetics in humans. *Journal of Applied Physiology*, 106(6), 1875-1887.
- Baker SJ, Grice J, Roby L & Matthews C (2000). Cardiorespiratory and thermoregulatory response of working in fire-fighter protective clothing in a temperate environment. *Ergonomics*, 43(9), 1350-1358.

- Barnard RJ & Anthony DF (1980). Effect of health maintenance programs on Los Angeles City firefighters. *Journal of Occupational Medicine.: Official Publication of the Industrial Medical Association*, 22(10), 667-669.
- Barnard RJ & Duncan HW (1975). Heart rate and ECG responses of fire fighters. *Journal of Occupational Medicine.: Official Publication of the Industrial Medical Association*, 17(4), 247-250.
- Barr D, Gregson W & Reilly T (2010). The thermal ergonomics of firefighting reviewed. *Applied Ergonomics*, 41(1), 161-172.
- Bhambhani Y, Maikala R & Buckley S (1998). Muscle oxygenation during incremental arm and leg exercise in men and women. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 78(5), 422-431.
- Bilzon JL, Scarpello EG, Smith CV, Ravenhill NA & Rayson MP (2001). Characterization of the metabolic demands of simulated shipboard Royal Navy fire-fighting tasks. *Ergonomics*, 44(8), 766-780.

- Bos J, Mol E, Visser B & Frings-Dresen M (2004). The physical demands upon (Dutch) fire-fighters in relation to the maximum acceptable energetic workload. *Ergonomics*, 47(4), 446-460.
- Bruce-Low SS, Cotterrell D & Jones GE (2007). Effect of wearing personal protective clothing and self-contained breathing apparatus on heart rate, temperature and oxygen consumption during stepping exercise and live fire training exercises. *Ergonomics*, 50(1), 80-98.
- Bugajska J, Zuzewicz K, Szmauz-Dybko M & Konarska M (2007). Cardiovascular stress, energy expenditure and subjective perceived ratings of fire fighters during typical fire suppression and rescue tasks. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 13(3), 323-331.
- Byrd R & Collins M (1980). Physiologic characteristics of fire fighters. *American Corrective Therapy Journal*, 34(4), 106-109.
- Cady LD, Bischoff DP, O'Connell ER, Thomas PC & Allan JH (1979). Strength and fitness and subsequent back injuries in firefighters. *Journal of Occupational Medicine*, 21(4), 269-272.

Canadian Human Rights Commission (2003). Bona fide occupational requirements and bona fide justifications under the Canadian Human Rights Act. <http://www.chrc-ccdp.ca/discrimination/occupational-en#asp-meiorin>. 03-15-2013.

Cotes JE (1969). Relationships of oxygen consumption, ventilation and cardiac frequency to body weight during standardized submaximal exercise in normal subjects. *Ergonomics*, 12(3), 415-427.

Davis P & Dotson C (1987). Physiological aspects of fire fighting. *Fire Technology*, 23(4), 280-291.

Deakin JM, Pelot RP, Smith JM, Stevenson JM, Wolfe LA, Lee SW (1996). *Development of a bona fide physical maintenance standard for CF and DND fire fighters*: 1-120. Queen's University, Kingston, Ont.

Del Sal M, Barbieri E, Garbati P, Sisti D, Rocchi MBL & Stocchi V (2009). Physiologic responses of firefighter recruits during a supervised live-fire work performance test. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 23(8), 2396-2404.

- Demarie S, Quaresima V, Ferrari M, Sardella F, Billat V & Faina M (2001). VO₂ slow component correlates with vastus lateralis de-oxygenation and blood lactate accumulation during running. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 41(4), 448-455.
- Dreger RW, Jones RL & Petersen SR (2006). Effects of the self-contained breathing apparatus and fire protective clothing on maximal oxygen uptake. *Ergonomics*, 49(10), 911-920.
- Dreger RW & Petersen SR (2007). Oxygen cost of the CF-DND fire fit test in males and females. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 32(3), 454-462.
- Eglin CM (2007). Physiological responses to fire-fighting: thermal and metabolic considerations. *Journal of the Human-Environment System*, 10(1), 7-18.
- Eglin CM, Coles S & Tipton MJ (2004). Physiological responses of fire-fighter instructors during training exercises. *Ergonomics*, 47(5), 483-494.
- Eves ND, Jones RL & Petersen SR (2005). The influence of the self-contained breathing apparatus (SCBA) on ventilatory function and maximal exercise. *Canadian Journal of Applied Physiology*, 30(5), 507-519.

- Faff J & Tutak T (1989). Physiological responses to working with firefighting equipment in the heat in relation to subjective fatigue. *Ergonomics*, 32(6), 629-638.
- Fernhall B, Fahs CA, Horn G, Rowland T & Smith D (2012). Acute effects of firefighting on cardiac performance. *European Journal of Applied Physiology*, 112(2), 735-741.
- Gavhed DC & Holmér I (1989). Thermoregulatory responses of firemen to exercise in the heat. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 59(1-2), 115-122.
- Giguère D et Marchand D (2002). *Lombalgies et accidents musculosquelettiques chez les pompiers*: 1-106. Institut Robert-Sauvé en santé et sécurité au travail, Montréal, Qc.
- Gledhill N & Jamnik VK (1992). Characterization of the physical demands of firefighting. *Canadian journal of sport sciences*, 17(3), 207-213.

- Goedecke JH, St Clair Gibson A, Grobler L, Collins M, Noakes TD & Lambert EV (2000). Determinants of the variability in respiratory exchange ratio at rest and during exercise in trained athletes. *American Journal of Physiology. Endocrinology and Metabolism*, 279(6), E1325-E1334.
- Green JS & Crouse SF (1991). Mandatory exercise and heart disease risk in fire fighters. A longitudinal study. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 63(1), 51-55.
- Guidotti TL (1992). Human factors in firefighting: ergonomic, cardiopulmonary, and psychogenic stress-related issues. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 64(1), 1-12.
- Harvey DG, Kraemer JL, Sharratt MT & Hughson RL (2008). Respiratory gas exchange and physiological demands during a fire fighter evaluation circuit in men and women. *European Journal of Applied Physiology*, 103(1), 89-98.
- Henderson ND, Berry MW & Matic T (2007). Field measures of strength and fitness predict firefighter performance on physically demanding tasks. *Personnel Psychology*, 60(2), 431-473.

- Hiroiyuki H, Hamaoka T, Sako T, Nishio S, Kime R, Murakami M & Katsumura T (2002). Oxygenation in vastus lateralis and lateral head of gastrocnemius during treadmill walking and running in humans. *European Journal of Applied Physiology*, 87(4-5), 343-349.
- Holmér I & Gavhed D (2007). Classification of metabolic and respiratory demands in fire fighting activity with extreme workloads. *Applied Ergonomics*, 38(1), 45-52.
- Im J, Nioka S, Chance B & Rundell KW (2001). Muscle oxygen desaturation is related to whole body VO_2 during cross-country ski skating. *International Journal of Sports Medicine*, 22(5), 356-360.
- Kawaguchi K, Tabusadani M, Sekikawa K, Hayashi Y & Onari K (2001). Do the kinetics of peripheral muscle oxygenation reflect systemic oxygen intake? *European Journal of Applied Physiology*, 84(1-2), 158-161.
- Kuehl KS, Kisbu-Sakarya Y, Elliot DL, Moe EL, Defrancesco CA, Mackinnon DP, Kuehl HE (2012). Body mass index as a predictor of firefighter injury and workers' compensation claims. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 54(5), 579-582.

- Lemon PW & Hermiston RT (1977). The human energy cost of fire fighting. *Journal of Occupational Medicine*, 19(8), 558-562.
- Louhevaara V, Ilmarinen R, Griefahn B, Künemund C & Mäkinen H (1995). Maximal physical work performance with European standard based fire-protective clothing system and equipment in relation to individual characteristics. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 71(2-3), 223-229.
- Martin BJ, Sparks KE, Zwillich CW & Weil JV (1979). Low exercise ventilation in endurance athletes. *Medicine and Science in Sports*, 11(2), 181-185.
- McLellan TM (1998). Sex-related differences in thermoregulatory responses while wearing protective clothing. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 78(1), 28-37.
- Michaelides MA, Parpa KM, Henry LJ, Thompson GB & Brown BS (2011). Assessment of physical fitness aspects and their relationship to firefighters' job abilities. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(4), 956-965.

- Mikkola J, Vesterinen V, Taipale R, Capostagno B, Hakkinen K & Nummela A (2011). Effect of resistance training regimens on treadmill running and neuromuscular performance in recreational endurance runners. *Journal of Sports Sciences*, 29(13), 1359-1371.
- Paavolainen L, Häkkinen K, Härmäläinen I, Nummela A & Rusko H (1999). Explosive-strength training improves 5-km running time by improving running economy and muscle power. *Journal of Applied Physiology*, 86(5), 1527-1533.
- Perroni F, Tessitore A, Cortis C, Lupo C, D'Artibale E, Cignitti L & Capranica L (2010). Energy cost and energy sources during a simulated firefighting activity. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(12), 3457-3463.
- Petersen SR, Dreger RW, Williams BE & McGarvey WJ (2000). The effects of hyperoxia on performance during simulated firefighting work. *Ergonomics*, 43(2), 210-222.
- Petruzzello SJ, Gapin JL, Snook E & Smith DL (2009). Perceptual and physiological heat strain: examination in firefighters in laboratory and field-based studies. *Ergonomics*, 52(6), 747-754.

- Powell KE, Thompson PD, Caspersen CJ & Kendrick JS (1987). Physical activity and the incidence of coronary heart disease. *Annual Review of Public Health*, 8, 253-287.
- Ressources humaines et Développement des compétences Canada (2013). <http://www5.rhdcc.gc.ca/CNP/Francais/CNP/2011/ProfilRechercheRapide.aspx?val=4&val1=4312&val65=pompiers>. 01-07-2013.
- Rhea MR, Alvar BA & Gray R (2004). Physical fitness and job performance of firefighters. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 18(2), 348-352.
- Rossi R (2003). Fire fighting and its influence on the body. *Ergonomics*, 46(10), 1017-1033.
- Saltin B (1985). Malleability of the system in overcoming limitations: functional elements. *The Journal of Experimental Biology*, 115, 345-354.
- Sheaff AK, Bennett A, Hanson ED, Kim Y-S, Hsu J, Shim JK & Hurley BF (2010). Physiological determinants of the candidate physical ability test in firefighters. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(11), 3112-3122.

- Shoemaker JK, Hodge L & Hughson RL (1994). Cardiorespiratory kinetics and femoral artery blood velocity during dynamic knee extension exercise. *Journal of Applied Physiology*, 77(6), 2625-2632.
- Sköldström B (1987). Physiological responses of fire fighters to workload and thermal stress. *Ergonomics*, 30(11), 1589-1597.
- Smith DL, Petruzzello SJ, Kramer JM & Misner JE (1997). The effects of different thermal environments on the physiological and psychological responses of firefighters to a training drill. *Ergonomics*, 40(4), 500-510.
- Sothmann M, Landy F & Saupe K (1992). Age as a bona fide occupational qualification for firefighting. A review on the importance of measuring aerobic power. *Journal of Occupational Medicine*, 34(1), 26-33.
- Sothmann M, Saupe K, Jasenof D & Blaney J (1992). Heart rate response of firefighters to actual emergencies: implications for cardiorespiratory fitness. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 34(8), 797-800.
- Sothmann M, Saupe K, Raven P, Pawelczyk J, Davis P, Dotson C & Siliunas M (1991). Oxygen consumption during fire suppression: error of heart rate estimation. *Ergonomics*, 34(12), 1469-1474.

Sothmann M, Saupe KW, Jasenof D, Blaney J, Fuhrman SD, Woulfe T & Davis PO (1990). Advancing age and the cardiorespiratory stress of fire suppression: determining a minimum standard for aerobic fitness. *Human Performance*, 3(4), 217.

Støren O, Helgerud J, Støa EM & Hoff J (2008). Maximal strength training improves running economy in distance runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 40(6), 1087-1092.

Thompson WR, Gordon FN, and Pescatello LS (2010). *ACSM's Guidelines for Exercise Testing and Prescription*. Lippincott Williams & Wilkins, Baltimore, Md., USA.

United States Fire Administration (2011). Firefighter fatalities in the United States in 2012. http://www.usfa.fema.gov/downloads/pdf/publications/ff_fat11.pdf. 07-03-2014.

United States Fire Administration (2012). Firefighter fatalities in the United States in 2012. http://www.usfa.fema.gov/downloads/pdf/publications/ff_fat12.pdf. 07-03-2014.

- von Heimburg ED, Rasmussen AKR & Medbo JI (2006). Physiological responses of firefighters and performance predictors during a simulated rescue of hospital patients. *Ergonomics*, 49(2), 111-126.
- Williford HN, Duey WJ, Olson MS, Howard R & Wang N (1999). Relationship between fire fighting suppression tasks and physical fitness. *Ergonomics*, 42(9), 1179-1186.
- Willson JD, Dougherty CP, Ireland ML & Davis IM (2005). Core stability and its relationship to lower extremity function and injury. *The Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*, 13(5), 316-325.
- Wilmore JH & Costill DL (2006). *Physiologie du sport et de l'exercice* (3ème édition). Bruxelles: De Boeck Université.
- Wu & Wang MJ (2002). Relationship between maximum acceptable work time and physical workload. *Ergonomics*, 45(4), 280-289.
- Wu & Wang MJ (2001). Determining the maximum acceptable work duration for high-intensity work. *European Journal of Applied Physiology*, 85(3-4), 339-344.