

Prévention des risques mécaniques et physiques

Études et recherches

RAPPORT R-891



Évaluation de nouvelles technologies visant à réduire le stress thermophysologique associé au port de vêtements individuels de protection pour les pompiers

*Denis Marchand
Chantal Gauvin
Alexis Brien-Breton
Mylène Aubertin-Leheudre
Dominic Tessier
Yann Sadier*



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

NOS RECHERCHES

travaillent pour vous !

Mission

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

Assurer la diffusion des connaissances et jouer un rôle de référence scientifique et d'expertise;

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

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

Pour en savoir plus

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour.
De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement.
www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CSST.
Abonnement : www.csst.qc.ca/AbonnementPAT

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec
2015
ISBN : 978-2-89631-828-5 (PDF)
ISSN : 0820-8395

IRSST - Direction des communications
et de la valorisation de la recherche
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail,
Septembre 2015

Prévention des risques mécaniques et physiques

Études et recherches

RAPPORT R-891

Évaluation de nouvelles technologies visant à réduire le stress thermophysiological associé au port de vêtements individuels de protection pour les pompiers

Avis de non-responsabilité

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

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

*Denis Marchand¹, Chantal Gauvin², Alexis Brien-Breton¹,
Mylène Aubertin-Leheudre¹, Dominic Tessier³, Yann Sadier³*

¹UQAM

²IRSST

³CTT



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

Cette étude a été financée par l'IRSST. Les conclusions et recommandations sont celles des auteurs.

ÉVALUATION PAR DES PAIRS

Conformément aux politiques de l'IRSST, les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Jean-Philippe Leduc-Gaudet, étudiant au Département des sciences de l'activité physique de l'UQAM, responsable du recrutement des volontaires, de la prise des mesures et d'une partie de l'analyse des résultats, de même que l'étudiante Haeila Vroye, qui a participé à la collecte des données du volet 1 de ce projet.

Nous exprimons aussi notre gratitude à Carole Roy, professionnelle de recherche spécialisée dans les mesures physiologiques au Département des sciences de l'activité physique de l'UQAM, responsable de l'installation des équipements et du soutien aux étudiants lors de la prise des mesures et du traitement des données.

SOMMAIRE

Les contraintes thermiques liées au port des vêtements individuels de protection (VIP) contre la chaleur et les flammes sont un problème préoccupant pour la santé et la sécurité des pompiers. Les matériaux utilisés dans la fabrication des VIP ont souvent le désavantage d'être lourds, rigides et d'empêcher l'évacuation de la chaleur produite par l'activité physique lors d'une intervention. Deux nouvelles technologies de matériaux ont été développées par le Groupe CTT, un centre de transfert technologique spécialisé dans la recherche et la conception de matériaux textiles, et ses partenaires industriels, afin de réduire les astreintes physiologiques des travailleurs exposés au stress thermique. L'une de ces technologies consiste en un système d'absorption de la chaleur, et l'autre est un nouveau matériau qui entre dans la fabrication d'un VIP. Réalisée en deux volets, cette étude avait comme objectif d'évaluer l'efficacité de ces deux technologies par une analyse de la réponse physiologique de sujets exposés à des conditions environnementales contrôlées.

Des sujets masculins (huit pour chacun des volets de l'étude) ont exécuté sur un tapis roulant des tests d'efforts avec une charge de travail équivalente à 250 Watts, dans une chambre climatique où la température et l'humidité relative étaient contrôlées et fixées à 35°C et 50 %, respectivement. Le protocole expérimental utilisé était basé sur la méthode d'essai normalisée ASTM F2300-10. Les astreintes thermophysiques exercées par les différentes conditions expérimentales ont été comparées à l'aide des variables suivantes : la consommation d'oxygène, la fréquence cardiaque, la perte hydrique, les températures cutanée et interne du corps, le taux d'humidité et la température à l'intérieur du VIP, ainsi que la perception psychophysique des sujets.

Dans le **premier volet** de l'étude, l'efficacité d'un système d'absorption de la chaleur, composé de nouveaux matériaux à changement de phase (MCP), a été évaluée. Une veste en tulle de nylon (prototype 1), munie de sachets contenant les MCP, était portée par-dessus un T-shirt de coton à l'intérieur d'un VIP standard. Les effets des MCP ont été évalués sous trois conditions expérimentales : 1) VIP standard seulement, 2) VIP standard et veste contenant les MCP, et 3) VIP standard et veste contenant une substance contrôle ayant un poids égal au MCP. Les résultats ont montré que les MCP permettent de réduire la température cutanée et de ralentir la progression de la température interne. Par contre, les effets sur la fréquence cardiaque et la déshydratation n'ont pas pu être établis de manière significative, possiblement en raison du fait que la veste n'était pas en contact direct avec le corps et que le T-shirt de coton a pu nuire à l'évaporation de la sueur. Le poids de la veste n'a pas semblé avoir un effet significatif sur les variables mesurées, au regard de la condition 3 par rapport aux deux autres conditions. À la suite de ces résultats, un nouveau prototype de veste a été conçu.

Dans le **second volet**, un nouveau matériau intégré double densité pour la fabrication d'un VIP a été évalué et comparé aux matériaux utilisés dans les habits de pompier standard. De plus, l'utilisation de MCP dans une nouvelle veste améliorée à la suite des résultats du premier volet, a aussi été évaluée. Remplaçant le T-shirt de coton, cette veste (prototype 2), fabriquée d'un tissu extensible conducteur et portée directement sur la peau, sous le VIP, a permis un meilleur échange thermique avec la peau. Quatre conditions expérimentales ont été comparées afin de mettre en évidence les effets du nouveau matériau double densité, ainsi que de la nouvelle veste contenant les MCP : 1) VIP standard et T-shirt, 2) VIP standard et MCP, 3) VIP à double densité

et T-shirt, et 4) VIP à double-densité et MCP. Les résultats ont démontré que l'introduction des MCP dans les VIP (standard et à double densité) favorise une réduction significative des astreintes thermophysiological, lorsque la veste permet un transfert thermique optimal avec la peau de l'utilisateur, comme c'était le cas pour le prototype 2. Pour sa part, le VIP à double densité semble créer un effet d'isolation plus important que celui du VIP standard. Cette isolation aurait un effet négatif sur le confort en conservant davantage la chaleur à l'intérieur du VIP lorsque la température interne du corps devient élevée. Toutefois, cette isolation semble devenir avantageuse lorsque la veste est portée sous l'habit, permettant de conserver l'effet refroidissant des MCP à l'intérieur du VIP et ainsi de maintenir une température interne basse.

Cette étude démontre la pertinence de la recherche et du développement de nouveaux matériaux dans le but d'améliorer l'efficacité de la thermorégulation lors du travail en ambiance chaude. Les conclusions obtenues ouvrent la voie à une optimisation de la disposition et de l'efficacité des MCP dans un VIP.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	I
SOMMAIRE	III
LISTE DES TABLEAUX	VII
LISTE DES FIGURES.....	IX
1. INTRODUCTION	1
2. ÉTAT DES CONNAISSANCES.....	3
2.1 Thermorégulation.....	3
2.2 Température interne du corps	4
2.3 Effet du travail physique	5
3. MÉTHODOLOGIE	7
3.1 Contrôle de l'environnement dans la chambre climatique	7
3.2 Sujets.....	7
3.3 Conditions expérimentales pour les deux volets.....	8
3.4 Variables mesurées.....	12
3.4.1 Consommation d'oxygène (VO ₂)	12
3.4.2 Fréquence cardiaque (FC)	12
3.4.3 Température cutanée.....	13
3.4.4 Température interne.....	13
3.4.5 Perte hydrique.....	13
3.4.6 Mesures psychophysiques	13
3.4.7 Mesures de la température et de l'humidité relative à l'intérieur du VIP	14
3.5 Procédure	14
3.6 Analyses statistiques.....	14
4. RÉSULTATS	17
4.1 Température ambiante et humidité relative dans la chambre.....	17
4.2 Analyse selon la méthode normalisée ASTM2300-10 pour le volet 1	17
4.2.1 Consommation d'oxygène (VO ₂)	18
4.2.2 Coût cardiaque relatif (CCR).....	19
4.2.3 Température cutanée.....	19

4.2.4	Température interne.....	20
4.2.5	Perte hydrique.....	20
4.2.6	Perception psychophysique	20
4.3	Analyse sur une base de temps uniforme pour le volet 1.....	20
4.3.1	Coût cardiaque relatif (CCR).....	21
4.3.2	Température cutanée.....	21
4.3.3	Température interne.....	22
4.4	Analyse sur une base de temps uniforme pour le volet 2.....	25
4.4.1	Consommation d'oxygène (VO ₂)	25
4.4.2	Coût cardiaque relatif (CCR).....	25
4.4.3	Température cutanée.....	27
4.4.4	Température interne.....	28
4.4.5	Perte hydrique.....	29
4.4.6	Perception psychophysique	30
4.4.7	Température à l'intérieur du VIP.....	31
4.4.8	Humidité relative à l'intérieur du VIP	32
5.	DISCUSSION.....	35
5.1	Volet 1.....	35
5.2	Volet 2.....	37
6.	LIMITES DE L'ÉTUDE	41
7.	CONCLUSION.....	43
	BIBLIOGRAPHIE.....	45
	ANNEXE A : TEST DE PRÉDICTION DE LA CONSOMMATION D'OXYGÈNE MAXIMALE.....	49
	ANNEXE B : ÉVALUATION PSYCHOPHYSIQUE DE L'EFFORT.....	51
	ANNEXE C : PROCÉDURE DE TEST.....	53

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1	Caractéristiques moyennes des sujets pour les volets 1 et 2 (écart type entre parenthèses).	8
Tableau 4.1	Durées d'exposition et critères d'arrêt (T_{int} : température interne; FC : fréquence cardiaque; Volontaire S : arrêt par le sujet ou Volontaire E : arrêt par l'expérimentateur), pour chacun des sujets, selon la condition.....	18
Tableau 4.2	Résultats des analyses statistiques de comparaison par paire pour la variation de la température cutanée selon la condition évaluée.	20
Tableau 4.3	Résultats des analyses statistiques de comparaison par paire pour la température cutanée selon la condition évaluée.....	22
Tableau 4.4	Résultats des analyses statistiques de comparaison par paire pour l'augmentation de la température interne des trois conditions selon le facteur intervalle_temps.	24
Tableau 4.5	Résultats des analyses statistiques de comparaison par paire selon la condition pour les différentes variables mesurées.	27

LISTE DES FIGURES

Figure 3.1	Vues d'un sujet instrumenté et de l'équipement à l'intérieur de la chambre climatique.	9
Figure 3.2	Sachet de MCP (A) et sachet de sable (B) utilisés dans cette étude.....	10
Figure 3.3	Prototype de veste du volet 1, permettant de contenir les sachets de MCP dans leur forme assemblée.	11
Figure 3.4	Prototype de veste du volet 2, composée d'un tissu conducteur et confortable pouvant être porté directement sur le corps.	12
Figure 4.1	Consommation d'oxygène pour les sept sujets pour la condition standard.	18
Figure 4.2	Variation de la température cutanée des sujets par minute, selon la condition évaluée (moyenne et intervalle de confiance).	19
Figure 4.3	Variation du coût cardiaque relatif selon la condition évaluée et le temps écoulé depuis le début du test (moyenne et intervalle de confiance).	21
Figure 4.4	Variation de la température cutanée selon la condition évaluée et le temps écoulé depuis le début du test (moyenne et intervalle de confiance).	22
Figure 4.5	Variation de la température interne pour les trois conditions évaluées (moyenne de tous les sujets).	23
Figure 4.6	Variation de la température interne selon la condition évaluée et le temps écoulé depuis le début du test (moyenne et intervalle de confiance).	23
Figure 4.7	Hausse de la température interne de chaque intervalle de temps selon la condition évaluée (moyenne et intervalle de confiance).	24
Figure 4.8	Consommation d'oxygène pour les quatre conditions évaluées (moyenne de tous les sujets).	25
Figure 4.9	Coût cardiaque relatif pour les quatre conditions évaluées (moyenne de tous les sujets).	26
Figure 4.10	Coût cardiaque relatif selon la condition évaluée et le temps écoulé depuis le début du test (moyenne et intervalle de confiance).	26
Figure 4.11	Température cutanée selon la condition évaluée et le temps écoulé depuis le début du test (moyenne et intervalle de confiance).	28
Figure 4.12	Température interne pour les quatre conditions évaluées (moyenne de tous les sujets).	28
Figure 4.13	Température interne selon la condition évaluée et le temps écoulé depuis le début du test (moyenne et intervalle de confiance).	29

Figure 4.14	Variation dans le temps de la perte hydrique mesurée selon la condition (moyenne et intervalle de confiance).	30
Figure 4.15	Cotes psychophysiques mesurées selon la condition et le temps écoulé depuis le début du test (moyenne et intervalle de confiance).....	31
Figure 4.16	Température mesurée à l'intérieur du VIP pour les quatre conditions évaluées (moyenne de tous les sujets).	31
Figure 4.17	Températures mesurées à l'intérieur du VIP selon la condition et le temps écoulé depuis le début du test (moyenne et intervalle de confiance).	32
Figure 4.18	Taux d'humidité relative mesuré à l'intérieur du VIP pour les quatre conditions évaluées (moyenne de tous les sujets).	33
Figure 4.19	Taux d'humidité relative mesurés à l'intérieur du VIP, selon la condition évaluée et le temps écoulé depuis le début du test (moyenne et intervalle de confiance).....	33
Figure B.1	Représentation des niveaux d'effort utilisés pour mesurer la perception psychophysique des participants selon l'échelle de Borg 6-20.....	51

1. INTRODUCTION

Le métier de pompier en est un à très haut risque. Au Canada, entre les années 2005 et 2010, 129 pompiers sont décédés dans l'exercice de leur fonction selon la Canadian Fallen Firefighters Foundation (CFFF) (2011). Aux États-Unis, une étude du National Fire Protection Association (NFPA) (Fahy et coll., 2011) rapporte que le nombre de pompiers décédés dans l'exercice de leur fonction a été de 105 en 2008, 82 en 2009 et 72 en 2010. Malgré la diminution annuelle du nombre de pompiers décédés aux États-Unis, le nombre d'accidents cardiovasculaires demeure stable depuis les six dernières années et continue d'être la principale cause de décès. Globalement, environ la moitié de ces décès sont attribuables à des accidents cardiovasculaires associés à l'exténuation (overexertion/stress). Les contraintes thermiques et physiologiques subies par les pompiers sont des facteurs qui contribuent aux accidents cardiovasculaires (Smith et coll., 2010).

Plusieurs études ont fait état des contraintes et des astreintes physiques et physiologiques auxquelles sont soumis les pompiers (Williams-Bell et coll., 2010; Holmér et Gavhed, 2007; von Heimburg et coll., 2006; Faff et Tutak, 1989; Smith et coll., 1997). Tous ces chercheurs s'entendent pour mentionner que le travail des pompiers est exigeant pour le système cardiorespiratoire, car il implique des efforts physiques importants (p. ex. : poids des outils manutentionnés, montée des échelles, etc.) dans des conditions de chaleur ambiante très élevée avec un vêtement qui préserve la chaleur et un appareil respiratoire autonome relativement lourd. Les pompiers doivent donc posséder des aptitudes physiques qui leur permettent de pallier ces contraintes (Baker et coll., 2000). En situation d'urgence, lorsqu'ils répondent aux exigences de leurs tâches de travail, les pompiers subissent des adaptations physiologiques qui peuvent être dangereuses pour leur santé (Griefahn et coll., 2003).

Les contraintes thermiques liées au port des vêtements individuels de protection (VIP) contre la chaleur et les flammes sont un problème préoccupant pour la santé et la sécurité des pompiers. Présentement, tous leurs habits sont composés de trois couches superposées: le revêtement extérieur résistant au feu (Nomex, Kevlar, etc.), l'écran humidifuge (membrane coupe-vapeur) et la doublure thermique. L'habit fournit donc au pompier une barrière thermique efficace contre la chaleur et le feu. Toutefois, de par sa conception et les matériaux qui le composent, il a souvent le désavantage d'être lourd, peu flexible et d'empêcher l'évacuation de la chaleur produite par l'activité métabolique du pompier. Il a été démontré que, sous l'action de la chaleur, le travail avec le port d'un VIP impose une plus grande astreinte physique que celle de travailler à 15 °C en tenue sportive, cette augmentation étant attribuable au poids des VIP et à leurs propriétés isolantes et imperméables (Sköldstrom, 1987). Le port du VIP augmente la fréquence cardiaque et la consommation d'oxygène (VO_2) de 17% et 11% respectivement, lors d'une course à 7 km/h par rapport à celui d'une tenue athlétique (Baker et coll. 2000). Selon Baker et coll. (1998), il serait important de voir si le poids ou les caractéristiques des VIP peuvent être reliés à des facteurs de risque et s'il est possible de diminuer l'importance de ces facteurs, car les pompiers doivent effectuer toutes leurs sorties en portant ces vêtements.

Pour diminuer les risques liés aux contraintes thermiques, le Collège de St-Hyacinthe, par l'entremise du Groupe CTT et de ses partenaires industriels, a développé deux technologies pour améliorer le confort thermophysique, la mobilité et la protection thermique des VIP. Ces

technologies répondent à la norme NFPA 1971 (NFPA 1971:2007), incluant évidemment la protection contre le feu et la protection thermique.

La première technologie est un système de thermorégulation de la température corporelle à l'aide de matériaux à changement de phase (MCP). Ce système se présente sous forme de sachets de 7,5 cm x 6,5 cm x 0,5 cm, pèse 16 grammes, et contient un matériau composite à changement de phase novateur à base de sels hydratés ignifuges. Les sachets sont insérés dans des pochettes cousues à une veste, et celle-ci est portée sous le VIP. Le MCP est un média de stockage de chaleur. Lorsqu'installé à l'intérieur d'un VIP, le MCP absorbe l'excès de chaleur généré par le corps lors d'activités intenses, permettant ainsi de réguler la température corporelle en produisant un effet de rafraîchissement. L'absorption de chaleur est possible grâce à la transition de phase solide-liquide du matériau. Les MCP conçus par le Groupe CTT ont une température de transition variant entre 29 et 45 °C, et une capacité d'absorption de chaleur entre 200 et 300 J/g.

L'autre technologie est un matériau double densité inventé pour fabriquer le VIP. Novateur, ce matériau conçu par le Groupe CTT et ses partenaires industriels consiste en un assemblage textile de deux tissus superposés et reliés physiquement par un fil continu. Le procédé s'apparente à la fabrication du velours à l'exception que les deux trames de tissus ne sont pas séparées à la fin de la confection, mais plutôt utilisées telles quelles. De plus, les tissus ont été tricotés plutôt que tissés, donnant ainsi une certaine extensibilité à l'ensemble. Cet assemblage de deux tissus, séparés, mais interreliés, procure une isolation thermique due à l'espace rempli d'air entre les deux couches de tissus. Ce matériau double densité est ensuite laminé à une membrane humidifuge formant ainsi une seule couche, au lieu d'avoir une barrière humidifuge et une barrière thermique séparées en deux couches, comme dans le cas d'un habit de pompier conventionnel. Couplé à un revêtement extérieur conventionnel (tissu coupe-feu comme les mélanges Kevlar/Nomex ou Kevlar/PBI par exemple), il permet donc une composition du VIP en deux couches plutôt que les trois couches de l'habit conventionnel. Cette nouvelle conception devait permettre d'augmenter la souplesse des VIP et l'aisance de mouvement, ainsi que d'améliorer l'évacuation de la chaleur produite à l'intérieur du vêtement lors d'un effort soutenu.

Des habits constitués de nouveaux matériaux plus souples et extensibles, ainsi que de systèmes d'absorption de la chaleur tels que les MCP visent une diminution des astreintes thermophysiques subies par les pompiers. Dans cette optique, cette étude se divisait en deux volets destinés à évaluer l'efficacité de ces deux technologies.

L'objectif du volet 1 était d'évaluer l'efficacité du système d'absorption de la chaleur composé des MCP novateurs, intégré à un premier prototype de veste et porté sous un VIP conventionnel.

L'objectif du volet 2 était d'apprécier l'efficacité du matériau double densité pour fabriquer le VIP, ainsi que celle d'un deuxième prototype de veste contenant les MCP, qui a été conçu en tenant compte des résultats du volet 1.

Pour atteindre ces objectifs, une analyse de la réponse physiologique de sujets lors de tests de marche sur un tapis roulant, avec l'utilisation des nouvelles technologies, a été réalisée dans des conditions environnementales contrôlées.

2. ÉTAT DES CONNAISSANCES

2.1 Thermorégulation

Le corps humain tente de maintenir sa température centrale constante autour de $37\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$; au-delà de cette limite, des problèmes physiologiques et une baisse de performance peuvent se produire. Selon Bommadevara et Zhu (2002), ces problèmes comprennent notamment : un changement dans l'activité enzymatique, une diminution de l'activité neuronale et une dénaturation de certaines protéines. Une variation de plus ou moins 6 °C de la température du noyau central est critique et, dans le cas d'une augmentation, celle-ci entraîne presque inévitablement la mort. Lors du travail en ambiance thermique chaude, un des mécanismes les plus efficaces de thermorégulation de l'homme est l'évaporation grâce à la production de sueur (Gagge et coll., 1937). En s'évaporant sur la peau, la sueur emporte une partie de la chaleur dans l'air ambiant. Toutefois, l'efficacité de ce mécanisme dépend de plusieurs facteurs, notamment le taux d'humidité, la vitesse de l'air, la mouillure cutanée, la perméabilité du vêtement à l'évaporation de la sueur ainsi que la température cutanée moyenne (Martinet et Meyer 1999). En ambiance chaude, la perte de chaleur par évaporation respiratoire est négligeable. Le taux d'humidité de l'air est, de loin, le prédicteur le plus important de l'efficacité de la perte de chaleur par évaporation (Nielsen et coll., 1997). Celui-ci représente le ratio entre l'eau contenue dans l'air ambiant à une température donnée et la quantité totale qui pourrait y être contenue. Lors de la sudation, l'eau qui s'accumule à la surface de la peau à travers les glandes sudoripares est évaporée dans l'air et contribue à augmenter ce pourcentage. Plus l'humidité relative est importante, plus la capacité de l'air ambiant à absorber de l'eau est diminuée rendant ainsi la perte de chaleur par évaporation de moins en moins efficace. C'est pourquoi dans une condition d'humidité relative très élevée, la perte de chaleur par évaporation est pratiquement nulle. Bien que de la sueur perle sur la peau et finit par s'écouler au sol, cette forme de sudation n'entraîne aucune perte de chaleur et peut mener à un état de déshydratation et d'hyperthermie. L'article de Nielsen et coll., publié en 1997, mentionne effectivement que ce n'est pas la sueur, mais bien l'évaporation de la sueur qui refroidit la peau.

Lors du port de vêtements individuels de protection, un microclimat est créé à l'intérieur de cet habit et entrave la dissipation efficace de la chaleur par évaporation (McLellan et coll. 1993). La saturation de l'air en humidité dans ce microclimat, une absence de perte de chaleur par convection ainsi qu'une mouillure cutanée importante entraînent une accumulation de chaleur rapide et importante par l'individu portant cet équipement (Wang et coll., 2012, McEntire et coll., 2013). De plus, le poids de cet équipement a pour effet d'augmenter l'astreinte physique imposée au travailleur et, par le fait même, sa production de chaleur liée au métabolisme. Il est important de noter que la variation d'un degré Celsius de la température interne corporelle représente la limite suggérée par plusieurs normes relatives au travail en ambiance thermique chaude (Predicted Heat Strain, Wet Bulb Globe Temperature, American Conference of Governmental Industrial Hygienists).

Le port d'une veste de refroidissement à l'intérieur des VIP semble être une avenue intéressante pour tenter de réduire l'impact négatif d'un microclimat. Gao et ses collaborateurs (2011a) ont évalué les effets du port d'une veste de refroidissement à base de MCP que les sujets devaient porter sous leur VIP. Ces MCP avaient deux différentes températures de fusion (24 °C et 28 °C) et ils ont été comparés à une condition sans veste de refroidissement, formant ainsi trois groupes de

tests (veste24, veste28 et groupe contrôle sans la veste). Les sujets marchaient sur un tapis roulant à une vitesse de 5 km/h dans une chambre où les conditions climatiques étaient contrôlées (température de l'air = 55 °C, humidité relative = 30%, la pression de vapeur = 4725 Pa, et la vitesse de l'air = 0,4 m/s). Leurs résultats ont démontré que la veste contenant les MCP avec une température de fusion plus basse (24°C) avait un effet de refroidissement sur la peau du torse plus élevé que celle avec les MCP possédant une température de fusion plus élevée (28°C). Toutefois, aucun des deux MCP testés n'avait d'effet significatif sur la réduction de la hausse de température interne durant l'exercice à la chaleur. Dans leur conclusion, ces chercheurs suggèrent d'étudier des MCP avec des températures de fusion plus basses pour avoir un effet sur la température interne du corps.

2.2 Température interne du corps

Dans sa revue sur les contraintes qui affectent la santé des pompiers, Eglin (2007) démontre que la lutte contre l'incendie implique une activité physique intense réalisée dans des conditions environnementales difficiles qui affectent principalement la température du corps. Le modèle qu'elle propose associe l'importance du stress thermique à quatre principaux facteurs. En effet, la combinaison du travail physique (intensité et durée), des conditions environnementales (chaleur et humidité relative élevées), des vêtements de protection et de la déshydratation se traduit par une température centrale élevée du corps.

Tel que mentionné précédemment, le travail en ambiance chaude enclenche des mécanismes de régulation physiologique permettant au corps de maintenir une température centrale proche de la valeur de référence ($37\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$). Toutefois, la durée d'exposition et les contraintes thermiques imposées à l'individu peuvent entraîner une astreinte thermique au-delà des capacités régulatrices du corps. Ces conditions se traduisent parfois par une incapacité à évacuer la chaleur corporelle pour conserver un équilibre thermique (ISO 14505-3:2006), ce qui entraîne des « troubles liés à la contrainte thermique en ambiance chaude ». Ces conditions se traduisent par une incapacité à évacuer la chaleur corporelle pour conserver un équilibre thermique (ISO 14505-3:2006), ce qui entraîne des « troubles liés à la contrainte thermique en ambiance chaude ». Les plus courants sont les crampes de chaleur, la syncope et le coup de chaleur en ordre croissant de sévérité.

Le coup de chaleur se caractérise par une défaillance des systèmes de thermorégulation due à une contrainte thermique trop importante (Brinquin et Buffat, 1994; Malchaire, 1996). Dans cette situation, l'interruption des systèmes de thermorégulation entraîne l'augmentation de la température centrale qui, à son tour, accroît la vitesse du métabolisme et ainsi, la production de chaleur. Ses trois signes caractéristiques sont : une peau chaude et sèche due à l'arrêt de la sudation, une température centrale supérieure à 40 °C et des signes neurologiques sévères incluant agitation, propos incohérents, délire, convulsion, coma. Bien que rare, cette condition est extrêmement préoccupante puisque la mortalité s'ensuit dans 15 à 25 % des cas (Martinet et Meyer, 1999). La chaleur corporelle élevée entraîne la destruction des membranes cellulaires et de certains systèmes enzymatiques sensibles à la chaleur (Bouchama et Knochel, 2002). Lorsqu'il se produit, le coup de chaleur doit être traité comme une urgence médicale et les efforts devraient être consacrés à refroidir le corps le plus rapidement possible. La probabilité de survie et de guérison sans séquelle dépend de la précocité du traitement. Lors du travail à la chaleur, il est essentiel de prévenir la déshydratation.

La déshydratation se caractérise par une perte d'eau excessive dans l'organisme. Chez un individu non acclimaté, la production horaire de sueur peut atteindre 0,75 litre/heure (Mairiaux et Malchaire, 1990). L'état de déshydratation se produit lorsque la perte hydrique n'est pas compensée par un apport équivalent. Une perte de un litre d'eau par la sudation représente environ 2,5 % du volume d'eau total d'un adulte (Candas et Botherel, 1989). Une réduction de 2 % du poids corporel par la perte hydrique entraîne une baisse des capacités de travail de 20 % (Wasterlund, 1998). Selon Geraut et Dupas (1991), l'accident de déshydratation peut survenir à partir du moment où la perte totale atteint 5 % du volume d'eau total de l'organisme. La norme ISO 7933:2005 stipule que la perte hydrique ne devrait pas excéder 5 % du poids total du corps pour un travailleur ayant la possibilité de se réhydrater à volonté et 3 % du poids total du corps pour un travailleur n'ayant pas accès à une source de réhydratation continue. Cette perte hydrique peut se mesurer en effectuant une pesée de l'individu et de ses vêtements en tenant compte des ingestions et excréta aussi bien liquides que solides. Lors d'un test de 60 minutes réalisé sur un tapis roulant à une vitesse de 3,5 km/h en ambiance chaude (45 °C), Sköldström (1987) a observé une hausse moyenne du poids du VIP de 674 grammes. En considérant seulement le poids de la sueur contenu dans le VIP, ceci représente une perte d'eau d'environ 1,7 % du poids total.

2.3 Effet du travail physique

Les composantes d'une dépense énergétique quotidienne comprennent le métabolisme de base, la thermogénèse ainsi que le métabolisme de travail en lien avec l'activité physique (McArdle, 2001). L'activité physique a, de loin, l'effet le plus prononcé sur la modification de la dépense énergétique de base chez l'humain. Ceci est dû au faible rendement énergétique de toute activité humaine alors qu'une grande partie de cette énergie est transformée en chaleur. Bien qu'au repos, la totalité de l'énergie utilisée par l'homme se transforme en chaleur, en mouvement une fraction de cette énergie produit du travail mécanique. L'excès de chaleur généré par cette augmentation du travail mécanique doit être évacué du muscle vers la peau et induit une élévation de la fréquence cardiaque. Ainsi, en plus de son estimation à partir de tables et de modèles, d'autres méthodes existent pour mesurer la dépense énergétique induite par le travail. Pour cette étude, la mesure de la fréquence cardiaque ainsi que celle de la VO_2 ont été retenues.

La mesure de la VO_2 est un test qui permet d'évaluer le métabolisme avec une précision moyenne de 5 % (ISO 8996) à 10 % (Astrand et Rodhal, 1994). Il permet d'apprécier la consommation d'oxygène (O_2) et se base sur la mesure des concentrations en O_2 et en CO_2 (dioxyde de carbone) dans l'air expiré et sur le débit ventilatoire. La prise de cette mesure lors d'un exercice modéré permet d'observer une augmentation rapide de la consommation d'oxygène pour atteindre un état d'équilibre après une à deux minutes (« steady state »). Par la suite, il s'établit une zone plateau reflétant l'équilibre entre l'énergie requise par les muscles actifs et la production d'énergie par le métabolisme aérobie. Cette mesure permet de déterminer la dépense énergétique réelle associée au travail musculaire, sans que celle-ci soit affectée par le travail en ambiance chaude. Brouha et coll. ont démontré dans leur étude (1963) que la température ambiante et le taux d'humidité influencent la fréquence cardiaque (FC) sans nécessairement augmenter la consommation d'oxygène. Ils ont observé qu'en ambiance chaude et humide, la relation entre FC et VO_2 ne reste pas constante; la FC continue d'augmenter malgré le maintien d'une consommation d'oxygène constante à travers le temps. Sköldström (1987) a démontré la même chose chez les pompiers munis d'un VIP et d'un appareil respiratoire

autonome (ARA). Lors d'un exercice de 60 minutes à 3,5 km/h, la température ambiante n'a pas d'effet sur la VO_2 des pompiers, mais elle a un effet sur leur FC.

La fréquence cardiaque est un des paramètres qui influence le débit sanguin dont le rôle consiste à irriguer les tissus. Ce paramètre détermine entre autres : l'apport d'oxygène et de nutriments aux cellules des tissus et l'élimination de leurs déchets, les échanges gazeux dans les poumons ainsi que l'absorption des nutriments contenus dans le système digestif (Marieb, 2005). Au repos, le débit sanguin est ajusté au fonctionnement adéquat de chaque tissu et organe et les muscles squelettiques, qui constituent près de la moitié de la masse corporelle (Chaffin et coll., 2006), reçoivent normalement environ 20 % du débit sanguin. Toutefois, durant l'exercice, l'augmentation de la fréquence cardiaque peut entraîner un apport sanguin aux muscles de l'ordre de 60 % du débit sanguin total. Les ajustements circulatoires se produisent lors de fluctuations de température perçues, soit par les récepteurs thermiques de la peau, soit par stimulation directe de l'hypothalamus. Lors d'un travail en ambiance chaude, la chaleur inhibe les fibres sympathiques adrénergiques responsables de la vasoconstriction. Ceci entraîne une vasodilatation périphérique et un débit sanguin vers la peau beaucoup plus important (Martinet et Meyer, 1999). Chez une personne au repos, le débit sanguin cutané est de l'ordre de 0,4 à 0,5 litre/minute. À la chaleur, celui-ci peut atteindre deux à trois litres/minute chez une personne au travail (Mairiaux et Malchaire, 1990).

3. MÉTHODOLOGIE

Pour évaluer l'efficacité des deux technologies, des tests de marche avec sujets sur un tapis roulant en ambiance thermique chaude ont été réalisés en deux volets : le volet 1 pour évaluer l'efficacité du système d'absorption de la chaleur composé des MCP novateurs et intégré à un premier prototype de veste porté sous un VIP conventionnel; et le volet 2 pour évaluer l'efficacité du matériau double densité entrant dans la confection d'un VIP, et d'un deuxième prototype de veste contenant les MCP et mis au point en prenant en compte les résultats du volet 1.

3.1 Contrôle de l'environnement dans la chambre climatique

La température et l'humidité relative étaient contrôlées par le panneau de configuration de la chambre climatique et mesurées afin de s'assurer qu'elles correspondaient aux valeurs souhaitées de 35 °C et 50 %. Les variations de température de l'air et d'humidité relative n'ont pas excédé $\pm 0,5$ °C et ± 5 % de la moyenne enregistrée pour une période de mesure de cinq minutes respectivement. Les données ont été mesurées à l'aide d'un appareil moniteur d'environnement thermal QuesTEMP° 32. Cet appareil attestait que la température radiante moyenne avait une différence maximale de $\pm 0,5$ °C avec la température de l'air enregistrée pour une période de mesure de cinq minutes. Il était positionné sur un trépied à une hauteur d'environ un mètre et à 80 cm du sujet. L'appareil était toujours mis en marche au moins 10 minutes avant le début du test sur le tapis roulant. Ces mesures ont été notées toutes les minutes durant chacun des tests d'uniformité de la chambre climatique. Un anémomètre ultrasonique 3D (modèle 81000, R.M. Young Company) a permis d'évaluer avec précision la vitesse de l'air avant le début de la série de tests, de manière à s'assurer que les valeurs mesurées ne variaient pas de ± 20 % de la moyenne enregistrée pour une période d'une durée de cinq minutes.

3.2 Sujets

Pour chaque volet de l'étude, huit sujets masculins ont été recrutés sur une base volontaire parmi les étudiants inscrits au baccalauréat d'intervention en activité physique de l'Université du Québec à Montréal (UQAM). Les sujets sélectionnés étaient non-fumeurs et avaient une bonne capacité cardiorespiratoire (VO_2). Afin de respecter les critères de la méthode d'essai normalisée ASTM F2300-10, leur âge devait se situer entre 21 et 40 ans, leur poids entre 65 et 100 kg et leur taille entre 1,70 et 1,95 m. Un test sous-maximal d'évaluation de la capacité cardiorespiratoire sur tapis roulant a permis d'établir que la VO_2 des sujets se situait entre 42,4 et 66,1 ml/kg/min. Le test était conforme aux recommandations de la norme ISO 8996:2004 à laquelle la méthode d'essai normalisée ASTM F2300-10 fait référence. Les détails de ce test de prédiction sont présentés à l'annexe A. Le Tableau 3.1 présente les caractéristiques des sujets pour les deux volets de l'étude. Afin de limiter les facteurs confondants, les conditions suivantes ont été respectées préalablement aux tests :

- Ne pas faire d'exercices soutenus 24 heures avant l'évaluation;
- Ne pas prendre de repas deux heures avant l'évaluation;
- Ne pas prendre de drogue ou de stimulant 12 heures avant l'évaluation;
- Faire la liste de la nourriture ingérée 12 heures avant l'évaluation;

- Boire un litre d'eau deux heures avant le test et un autre 500 ml 30 minutes avant le test.

Tableau 3.1 Caractéristiques moyennes des sujets pour les volets 1 et 2 (écart type entre parenthèses).

Volet	Âge (ans)	Taille (cm)	Poids (kg)	% gras	VO ₂ max estimée (ml/kg/min)
1	23 (± 2,5)	177,8 (± 4,7)	81,7 (± 8,1)	10,6 (± 3,1)	56,3 (± 7,8)
2	22 (± 0,9)	181,8 (± 5,5)	83,5 (± 5,5)	10,9 (± 2,9)	56,2 (± 7,7)

3.3 Conditions expérimentales pour les deux volets

L'ensemble du protocole expérimental était conforme à la méthode d'essai normalisée ASTM F2300-10 « Standard Test Method for Measuring the Performance of Personal Cooling Systems Using Physiological Testing ». Les tests sur tapis roulant se sont déroulés en ambiance thermique chaude dans une chambre climatique où la température était stable à 35 °C (± 0,5 °C) et l'humidité relative à 50 % (± 5 %).

Les tests sur le tapis roulant étaient effectués à une charge de travail équivalente à 250 Watts. Cette intensité était suffisante pour produire une réponse thermorégulatrice chez le participant et a été choisie pour maintenir une charge cardiorespiratoire qui se situait en deçà de 85 % de la fréquence cardiaque maximale pendant la durée complète des tests. Pour obtenir cette charge, la vitesse du tapis roulant a été réglée à 5,5 km/h et la pente du tapis a été ajustée en fonction de l'équation fournie par la méthode d'essai normalisée ASTM F2300-10 (Équation 1) :

Équation 1 Charge de travail externe

$$CTE = \frac{mg \left\{ \sin \left[\tan^{-1} \left(\frac{\%pente}{100} \right) \right] D \right\}}{T}$$

où *CTE* représente la charge de travail externe en Watts, *m* représente la masse en kilogrammes du sujet, *g* l'accélération gravitationnelle en m/s², *%pente* le pourcentage d'inclinaison du tapis roulant, *D* la distance parcourue en mètres et *T* le temps écoulé en secondes. Le port d'un VIP augmente l'intensité de l'exercice. Ainsi, le poids du VIP et celui de l'équipement étaient ajoutés au poids du sujet lors du calcul de la charge de travail externe. Cette charge était la même pour toutes les conditions des deux volets puisque le poids des MCP, de la condition contrôle ou du VIP avec matériau double densité n'ont pas influencé de façon significative la consommation d'oxygène lors des tests, auquel cas la pente du tapis roulant aurait été ajustée pour correspondre à la charge physiologique obtenue lors de l'évaluation du VIP standard. La Figure 3.1 présente un sujet instrumenté sur le tapis roulant à l'intérieur de la chambre climatique.



Figure 3.1 Vues d'un sujet instrumenté et de l'équipement à l'intérieur de la chambre climatique.

Pour le volet 1, les tests ont été poursuivis jusqu'à ce qu'un des critères d'arrêt stipulé dans la méthode d'essai normalisée (ASTM F2300-10) fut atteint, soit :

- Arrêt volontaire du participant ou de l'expérimentateur (fatigue ou symptômes de troubles liés à la contrainte thermique en ambiance chaude);
- Fréquence cardiaque dépassant 85 % de la FC maximale estimée;
- Température interne supérieure à 39 °C ou température cutanée moyenne dépassant 38 °C;
- Durée du test dépassant deux heures.

Pour le volet 2, la durée maximale des tests était de 60 minutes.

Pour les deux volets de l'étude, les sujets ont porté les équipements spécifiés par les chercheurs. De manière générale, les sujets devaient porter, sous le VIP, un T-shirt et un caleçon boxer spécifiques fournis par l'expérimentateur. Chaque sujet avait un VIP ajusté à sa taille pour les volets 1 et 2. Le port de l'équipement complet n'étant pas requis par la méthode ASTM F2300-10, il fut donc restreint aux parties limitant la dissipation de la chaleur du corps vers l'environnement soit : le harnais de l'appareil de protection respiratoire (sans la bonbonne) ainsi que des chaussettes et des espadrilles de courses (fournies par le sujet). Les VIP ont été nettoyés selon les spécifications du fabricant avant le début des essais.

Pour le **volet 1**, l'efficacité d'un système d'absorption de la chaleur composé de MCP était la principale variable étudiée. Pour ce faire, les contraintes thermophysiques associées au port

d'un VIP standard ont été comparées à celles d'un VIP standard porté sur une veste qui incorporait la technologie de MCP. Le VIP standard était un habit de pompier formé des trois couches conventionnelles, c.-à-d. un revêtement extérieur résistant au feu (Kevlar®/Nomex® IIIA), un écran humidifuge (GORE® RT7100) et une doublure thermique (Xtra-Lite™ Chambray). La veste était portée par-dessus un T-shirt (fourni par l'expérimentateur) et sous le VIP.

Afin de faire ressortir l'efficacité des MCP pour cette étude, il était important de reproduire une situation avec une substance contrôle qui offrait un poids et une surface de contact équivalents à ceux des MCP mais sans leurs propriétés d'absorption de la chaleur. La substance qui a été utilisée lors de cette condition (condition contrôle) était du sable, réparti dans des sachets de plastique d'une grandeur égale et d'un poids équivalent à ceux des sachets contenant les MCP (Figure 3.2). Les sachets de sable ont été insérés dans les pochettes de la veste, au lieu de ceux contenant les MCP.

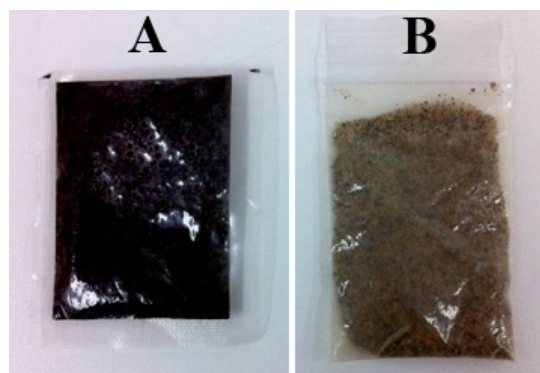


Figure 3.2 Sachet de MCP (A) et sachet de sable (B) utilisés dans cette étude.

Ainsi, pour ce volet, trois conditions expérimentales, considérées ici comme les variables indépendantes du volet 1, ont été comparées :

1. Condition standard : VIP standard seulement;
2. Condition MCP : VIP standard + veste contenant les MCP;
3. Condition contrôle : VIP standard + veste contenant une substance contrôle ayant un poids égal au MCP.

Un premier prototype de veste (volet 1) a été développé afin de contenir les sachets de MCP (ou de sable), puisque ceux-ci ne peuvent être incorporés directement aux VIP. Dans une optique d'efficacité, trois caractéristiques principales ont dû être respectées. Premièrement, la veste devait être la plus légère possible afin d'éviter que ses propriétés influencent le coût énergétique associé aux conditions. Ensuite, le tissu se devait d'être très perméable à l'air puisque la veste représentait une barrière supplémentaire à l'échange thermique entre les MCP et le corps. Finalement, dans un souci de confort et d'efficacité, une certaine souplesse (ou élasticité) était recherchée afin que les MCP puissent mouler le corps du sujet sans toutefois restreindre sa mobilité. Le prototype a donc été confectionné à l'aide d'un dossard en tulle de nylon (« mesh »), matériel idéal en termes de poids et de perméabilité à l'air (Figure 3.3). Cette veste

était constituée de trois panneaux s'assemblant à l'aide de velcro et de bandes élastiques pour s'ajuster au corps des sujets. Munie de 40 pochettes cousues à même le tissu pour contenir les sachets de MCP ou de sable, la veste pesait 866 grammes.



Figure 3.3 Prototypage de veste du volet 1, permettant de contenir les sachets de MCP dans leur forme assemblée.

Pour le **volet 2**, un VIP composé d'un nouveau matériau double densité (DD) a été comparé au VIP standard. Ce VIP-DD a été conçu par un consortium industriel dirigé par le Groupe CTT selon un modèle similaire au VIP standard utilisé dans le volet 1, à l'exception des plis à la hauteur du genou qui ont été enlevés, ce qui favorisait moins la flexion du genou comparativement au VIP standard. Le revêtement extérieur de cet habit était aussi fait de Kevlar®/Nomex® IIIA, mais la barrière humidifuge était constituée d'une membrane de ePTFE microporeuse, fournie et laminée par un membre du consortium industriel.

Un nouveau prototype de veste pour les MCP a aussi été évalué lors du volet 2 de la présente étude. Ce deuxième prototype de veste a été conçu pour assurer une meilleure efficacité des MCP à la suite des résultats obtenus lors du volet 1. Les fibres utilisées pour la fabrication et le design de la veste permettaient un échange optimal entre la peau et les MCP. Composée d'un tissu conducteur, extensible et confortable, cette veste pouvait être portée directement sur le corps en remplacement du T-shirt (Figure 3.4). Elle était munie de 46 pochettes pouvant contenir les sachets de MCP, plutôt que 40 comme le premier prototype. Les pochettes additionnelles étaient placées sur les côtés, afin d'améliorer la performance du système de thermorégulation comparativement au premier prototype. Le poids total de cette veste chargée était de 1162 grammes pour la grandeur moyenne et de 1178 grammes pour la grandeur large. Pour ce volet, quatre conditions expérimentales ont été comparées :

1. VIP standard et T-shirt
2. VIP standard et veste MCP
3. VIP DD et T-shirt
4. VIP DD et veste MCP



Figure 3.4 Prototype de veste du volet 2, composée d'un tissu conducteur et confortable pouvant être porté directement sur le corps.

3.4 Variables mesurées

3.4.1 Consommation d'oxygène (VO_2)

Cette variable a servi à quantifier les astreintes mécanique et énergétique exercées sur les systèmes musculaire et cardiorespiratoire à travers la mesure de la ventilation ainsi que la production d' O_2 et de CO_2 pour les différentes conditions de l'étude. Ces données ont été recueillies une fois toutes les 15 secondes à l'aide d'un analyseur métabolique (MOXUS modular VO_2 System, AEI Technologies). Cette variable était principalement influencée par l'intensité du travail demandé au sujet (vitesse et pente du tapis roulant), le poids des matériaux utilisés pour la confection du VIP ainsi que la malléabilité de ces derniers.

3.4.2 Fréquence cardiaque (FC)

Cette variable représente l'effort que le cœur doit fournir afin de répondre aux besoins engendrés par diverses situations d'exercice ou de repos. Ces données ont été recueillies aux 15 secondes à l'aide d'un analyseur métabolique (MOXUS modular VO_2 System) muni d'un cardiofréquencemètre (POLAR Model RS800) afin d'obtenir un couple FC/ VO_2 précis. Pour cette étude, la FC a également servi à observer l'effet de la contrainte thermique produit par l'environnement et le VIP. En effet, lorsque la température corporelle augmente, les besoins en thermorégulation s'ajoutent à ceux de l'astreinte musculaire imposée par l'exercice et contribuent à augmenter le rythme cardiaque.

Afin de limiter les différences intra-individuelles liées au rythme basal, les données de fréquence cardiaque ont été analysées en termes de coût cardiaque relatif (CCR) qui tient compte de la fréquence de repos (FC_{repos}), de la fréquence maximale prédite du sujet ($FC_{\text{max}} = 220 - \text{l'âge}$) (ACSM, 2000) et de la fréquence à laquelle l'activité est effectuée (FC_{travail}). L'équation 2 présente le calcul permettant de convertir les valeurs de fréquence cardiaque en coût cardiaque relatif.

Équation 2 Coût Cardiaque Relatif

$$CCR = \frac{(FC_{travail} - FC_{repos})}{(FC_{max} - FC_{repos})}$$

3.4.3 Température cutanée

Cette variable a permis de déterminer la température globale de la peau selon une moyenne pondérée à partir des températures mesurées en huit zones, recueillies à l'aide de huit capteurs (modèle MP150, Biopac Systems) disposés à des endroits spécifiques soit : le front, l'omoplate, la poitrine, le bras, l'avant-bras, la main, la cuisse et le mollet. Ces capteurs ont été conçus pour mesurer à toutes les 15 secondes des températures moyennes variant entre 20 °C et 40 °C avec une précision de $\pm 0,1$ °C. La température globale de la peau a été calculée selon l'équation 3, tirée de la norme ISO 9886:2004 à laquelle réfère la méthode d'essai normalisée ASTM F2300-10. Les constantes de l'équation représentent le ratio de la surface corporelle en contact avec l'environnement.

Équation 3 Température globale de la peau

$$T_{\text{peauMoy}} = (\text{Front} \times 0,07) + (\text{Omoplate droite} \times 0,175) + (\text{Poitrine gauche} \times 0,175) \\ + (\text{Bras droit} \times 0,07) + (\text{Avant-bras gauche} \times 0,07) \\ + (\text{Main gauche} \times 0,05) + (\text{Cuisse droite} \times 0,19) + (\text{Mollet gauche} \\ \times 0,20)$$

3.4.4 Température interne

Cette variable a permis de mesurer la température corporelle interne (core) grâce à une sonde jetable (Core Temperature Pill) qui était ingérée par le sujet. Celle-ci devait être ingérée au moins 45 minutes avant le début des tests et fournissait une lecture de la température centrale aux 15 secondes. Les données des températures cutanée et corporelle ont été recueillies à l'aide de l'appareil Equivital™ Life Monitor (modèle LM1000, Bio-Lynx Scientific Equipment) avec une précision de $\pm 0,1$ °C.

3.4.5 Perte hydrique

Cette variable a permis de déterminer la perte de fluide occasionnée par les différentes conditions imposées dans le contexte de cette étude. La perte hydrique a été calculée en effectuant une pesée du sujet avant et après les tests. La même chose a été effectuée avec les vêtements et les équipements dans le but d'estimer la quantité de sueur retenue par ces derniers. Comme cette valeur était influencée par la durée de la condition, la variable a été quantifiée sous forme de perte hydrique dans le temps (g/min) et permettait d'évaluer la sévérité de l'astreinte sudorale imposée par le port des différents VIP étudiés.

3.4.6 Mesures psychophysiques

Cette variable a permis de compléter les méthodes physiques et physiologiques d'évaluation lors de la réalisation des différentes conditions expérimentales. Cette variable a été mesurée à

l'aide de l'échelle de Borg 6-20 (Annexe B), qui correspond au fait que chez les jeunes adultes, la fréquence cardiaque varie généralement de 60 à 200 battements par minute. Ceci équivaut donc à la plage entre l'état de repos et la fréquence cardiaque maximale. Durant toute la séance, le participant devait transmettre à l'expérimentateur sa perception de l'effort. La mesure était prise :

- Aux cinq minutes durant les 20 premières minutes du test;
- Aux deux minutes 30 secondes durant les minutes 20 à 30 du test;
- Aux deux minutes entre les minutes 30 et 60 du test;
- À chaque minute au-delà de 60 minutes et pour toute la durée résiduelle du test.

Cette mesure était transmise à l'expérimentateur par signe des doigts de la part du sujet puisque la communication verbale n'était pas possible.

3.4.7 Mesures de la température et de l'humidité relative à l'intérieur du VIP

Pour le volet 2, des mesures visant à démontrer le comportement du microclimat à l'intérieur des VIP ont été prises à l'aide d'un Data-logger (ACR-01-0194). La sonde était située sous la veste du VIP à la hauteur du sternum. Cet appareil a permis de mesurer et d'enregistrer un échantillon de la température et de l'humidité relative à chaque 15 secondes pendant la durée des tests.

3.5 Procédure

Préalablement à l'arrivée du sujet, plusieurs étapes devaient être complétées afin de permettre une collecte de données fiable. Les grandes étapes de préparation et la liste de vérification utilisée avant l'arrivée du sujet et lors des tests sont présentées à l'annexe B.

À son arrivée, le sujet était informé verbalement du déroulement de l'expérience. Il avait déjà pu prendre connaissance de ces informations puisque celles-ci étaient incluses dans le formulaire de consentement qui lui avait été remis une semaine avant le début des tests. Les formulaires de consentements et le questionnaire de santé (QAAP) devaient être signés avant d'entamer la séance. La première visite consistait en une séance de familiarisation au cours de laquelle une condition était sélectionnée aléatoirement afin d'accoutumer le sujet au port des différents appareils et au déroulement des tests. Cette séance n'était pas incluse dans l'analyse statistique, ce qui a permis entre autres de limiter les effets de laboratoire sur des variables sensibles telles que la FC. Tous les tests ont été réalisés avec un seul sujet par demi-journée qui avait lieu le matin vers 10h00. Pour chaque sujet, un repos d'une durée minimale de deux jours était imposé entre les évaluations, et les différentes conditions étaient testées dans un ordre aléatoire.

3.6 Analyses statistiques

Les données ont été analysées à l'aide du logiciel SPSS v.20.0. Des analyses de la variance (ANOVA) à mesures répétées ont été effectuées sur les données suivantes en conformité avec la méthode d'essai normalisée ASTM F2300-10 : durée d'exposition, charge de travail externe, consommation d'oxygène, fréquence cardiaque, température cutanée, température interne, perte

hydrique, perception psychophysique, température et humidité relative à l'intérieur du VIP. La comparaison des effets principaux a été réalisée avec un ajustement de l'intervalle de confiance (Bonferroni) pour l'ensemble des tests, exception faite des analyses pour lesquelles le degré de significativité était faible et où cet ajustement sévère de l'intervalle de confiance jumelé à un manque de puissance statistique (nombre de sujets restreint) aurait pu contribuer à augmenter le taux d'erreur de type II (faux négatif). Dans ces cas particuliers, la comparaison des effets principaux était faite sans ajustement de l'intervalle de confiance (LSD [aucun]).

Toutefois, afin d'obtenir des valeurs comparables entre sujets, il semblait également judicieux d'effectuer ces analyses de la variance (ANOVA) à mesures répétées en conservant une durée d'exposition fixe et uniforme pour tous les sujets, dans ce cas-ci : 45 minutes. Cette valeur a été déterminée en considérant le temps minimal ayant été respecté, tous sujets et conditions confondus. De plus, cette durée a été sectionnée en trois blocs de 15 minutes chacun afin d'observer l'évolution des différentes variables. Ce choix a été fait considérant que les MCP peuvent entraîner un délai d'action (avant d'influencer une variable aussi stable que la température interne, par exemple) et une durée d'efficacité restreinte. En analysant la condition de manière globale, il est possible de diluer ces effets et de négliger des différences significatives entre les conditions. Finalement, puisque les sujets étaient comparés à eux-mêmes et que les variations intra-individuelles peuvent avoir un grand impact sur les différents paramètres physiologiques, la plupart des variables ont été converties afin d'illustrer une progression dans le temps entre deux mesures. Ainsi, plutôt que d'analyser la température cutanée au temps 1 correspondant à 15 minutes, nous avons analysé l'augmentation de la température cutanée entre le temps 0 et le temps 1. Il est important de mentionner que les résultats du volet 2 ont été analysés en tenant compte uniquement d'une période de 45 minutes nécessaire à la réalisation des conditions évaluées.

L'analyse des résultats a permis de quantifier l'effet des variables indépendantes (les différentes conditions) sur les principales variables mesurées. Elle fournit une évaluation quantitative des avantages associés à l'utilisation du MCP dans le VIP. Le niveau de confiance étant établi à 95 %, la valeur de « p » plus petite que 0,05 a été utilisée lors de cette analyse.

4. RÉSULTATS

4.1 Température ambiante et humidité relative dans la chambre

Le contrôle de l'environnement était un aspect primordial à considérer lors de l'étude, c'est la raison pour laquelle l'ambiance thermique, soit la température ambiante et l'humidité relative à l'intérieur de la chambre climatique, a été analysée. Pour le volet 1, l'analyse de variance à mesures répétées réalisée sur la température ambiante n'a pas permis de déceler de différence significative ($p = 0,496$) entre la condition standard ($35,11 \pm 0,23$ °C), MCP ($35,00 \pm 0,26$ °C) et contrôle ($34,98 \pm 0,27$ °C). Même constat pour l'analyse de variance à mesures répétées réalisée pour l'humidité relative qui ne présente pas de différence significative ($p = 0,289$) entre la condition standard ($49,00 \pm 0,76$ %), MCP ($49,13 \pm 0,35$ %) et contrôle ($49,50 \pm 0,53$ %). Ceci démontre que les trois conditions du volet 1 ont été effectuées alors que la température ambiante et l'humidité relative étaient comparables.

Il en est de même pour le volet 2. En effet, l'analyse de variance à mesures répétées réalisée sur la température ambiante n'a pas permis de déceler de différence significative ($p = 0,345$) entre la condition standard/T-Shirt ($35,09 \pm 0,12$ °C), standard/MCP ($35,19 \pm 0,11$ °C), DD/T-Shirt ($35,04 \pm 0,24$ °C) et DD/MCP ($35,08 \pm 0,17$ °C). Même constat pour l'analyse de variance à mesures répétées réalisée pour l'humidité relative qui ne présente pas de différence significative ($p = 0,858$) entre la condition standard/T-Shirt ($49 \pm 0,93$ %), standard/MCP ($48,75 \pm 0,46$ %), DD/T-Shirt ($49,25 \pm 1,98$ %) et DD/MCP ($48,88 \pm 0,84$ %). Ceci démontre que les quatre conditions du volet 2 ont été effectuées sous une température ambiante et une humidité relative comparables.

4.2 Analyse selon la méthode normalisée ASTM2300-10 pour le volet 1

Le Tableau 4.1 fournit un résumé par sujet de la durée d'exposition pour chaque condition et de la nature de l'arrêt de la condition. Malheureusement, en raison de certains problèmes techniques durant la collecte des données, le sujet PO-P04 a dû être exclu de l'analyse des résultats. Plus de la moitié des tests ont été arrêtés parce que la température interne excédait 39 °C. L'analyse de variance à mesures répétées de la durée d'exposition moyenne n'a décelé aucune différence significative pour le facteur condition ($p = 0,123$), bien que la moyenne de durée d'exposition des sujets ait été légèrement supérieure pour la condition MCP (63,21 minutes) comparativement aux conditions standard (59,0 minutes) et contrôle (55,93 minutes).

Toutes les variables, à l'exception de la consommation d'oxygène, ont été quantifiées en fonction de leur variation dans le temps (VDT), aussi exprimée sous l'appellation anglaise « rate of change ». L'équation 4 présente le calcul permettant de transformer une variable en valeur comparable dans le temps, où la VDT représente la variation dans le temps, M_{finale} la mesure finale de la variable concernée et M_{initiale} la mesure initiale de la variable concernée.

Tableau 4.1 Durées d'exposition et critères d'arrêt (T_{int} : température interne; FC : fréquence cardiaque; Volontaire S : arrêt par le sujet ou Volontaire E : arrêt par l'expérimentateur), pour chacun des sujets, selon la condition.

Sujets	Condition standard		Condition MCP		Condition contrôle	
	Durée (min)	Critère d'arrêt	Durée (min)	Critère d'arrêt	Durée (min)	Critère d'arrêt
PO-P01	66	$T_{int} > 39\text{ °C}$	74	$T_{int} > 39\text{ °C}$	63	$T_{int} > 39\text{ °C}$
PO-P02	53	$T_{int} > 39\text{ °C}$	52,5	$FC > 85\% FC_{max}$	58	$T_{int} > 39\text{ °C}$
PO-P03	75	$T_{int} > 39\text{ °C}$	90	$T_{int} > 39\text{ °C}$	70	$T_{int} > 39\text{ °C}$
PO-P05	61	$T_{int} > 39\text{ °C}$	76	$T_{int} > 39\text{ °C}$	55	$FC > 85\% FC_{max}$
PO-P06	48	Volontaire S	48	$T_{int} > 39\text{ °C}$	46	$T_{int} > 39\text{ °C}$
PO-P07	64	Volontaire S	55	Volontaire S	50	Volontaire S
PO-P08	46	Volontaire E	47	Volontaire E	49	Volontaire E

Équation 4 Variation dans le temps

$$VDT = \frac{(M_{finale} - M_{initiale})}{durée\ d'exposition(minutes)}$$

4.2.1 Consommation d'oxygène (VO_2)

La Figure 4.1 présente l'évolution de la consommation d'oxygène pour les sept sujets selon la condition standard. La consommation d'oxygène augmentait rapidement durant les deux à trois premières minutes, puis atteignait un plateau qui se maintenait jusqu'à la fin du test. Ce type d'évolution de la consommation d'oxygène était semblable pour les autres conditions.

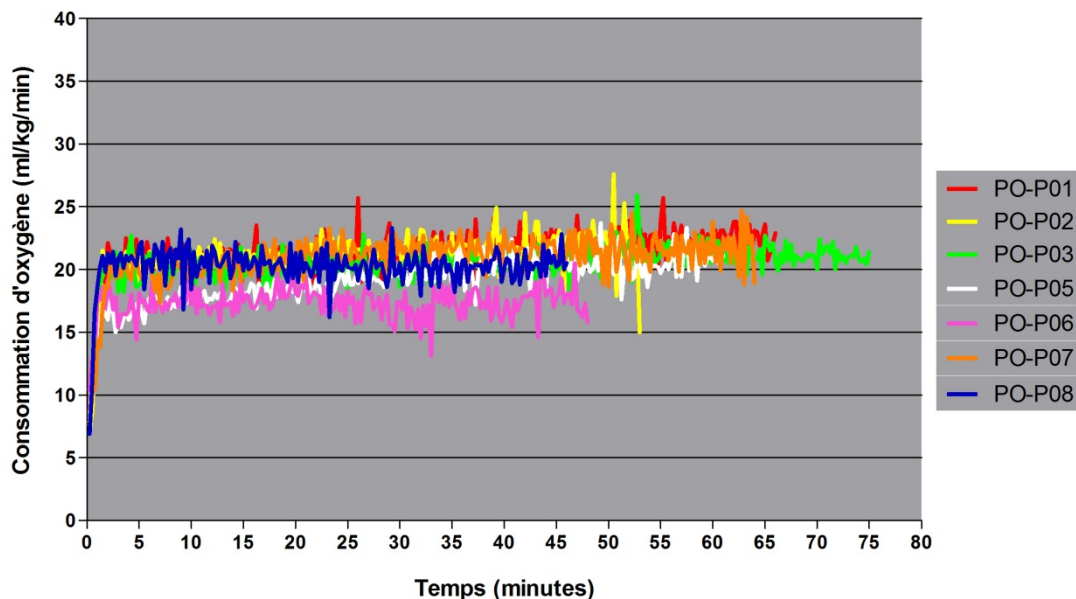


Figure 4.1 Consommation d'oxygène pour les sept sujets pour la condition standard.

Il est à noter que les données de chaque sujet ont été analysées à partir de la 3^e minute jusqu'à l'arrêt du test, afin d'éliminer la phase d'adaptation de la consommation d'oxygène à l'effort. L'analyse de variance à mesures répétées pour les conditions standard (20,76 ml/kg/min), MCP (20,12 ml/kg/min) et contrôle (21,13 ml/kg/min) n'a pas permis de déceler de différence significative pour le facteur condition ($p = 0,167$). Ceci confirme que les trois conditions ont été effectuées avec une charge métabolique comparable.

4.2.2 Coût cardiaque relatif (CCR)

L'analyse de la variation dans le temps du CCR moyennée des sujets ne présente pas d'écarts importants entre les différentes conditions évaluées. L'analyse de variance à mesures répétées pour les conditions standard (0,71 %/min), MCP (0,68 %/min) et contrôle (0,74 %/min) n'a pas permis de déceler de différence significative pour le facteur condition ($p = 0,468$).

4.2.3 Température cutanée

La Figure 4.2 présente la variation dans le temps de la température cutanée des sujets, selon les différentes conditions évaluées. L'analyse de variance à mesures répétées pour les conditions standard (0,075 °C/min), MCP (0,067 °C/min) et contrôle (0,083 °C/min) a démontré une différence significative pour le facteur condition ($p = 0,002$). Le Tableau 4.2 présente l'analyse statistique de comparaison par paire de cette variable. Ces résultats semblent démontrer une augmentation plus lente de la température cutanée pour la condition MCP comparativement aux conditions standard et contrôle.

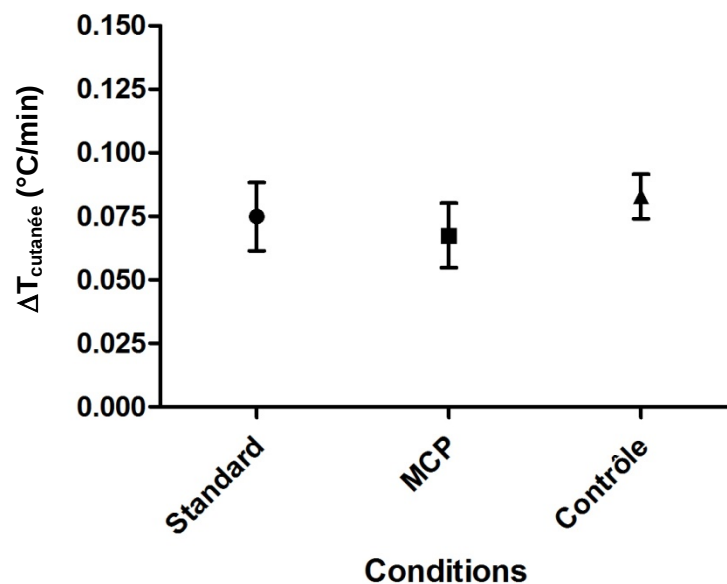


Figure 4.2 Variation de la température cutanée des sujets par minute, selon la condition évaluée (moyenne et intervalle de confiance).

Tableau 4.2 Résultats des analyses statistiques de comparaison par paire pour la variation de la température cutanée selon la condition évaluée.

	Standard	MCP	Contrôle
Standard			
MCP	0,021*		
Contrôle	0,087	0,005*	

* $p < 0,05$

4.2.4 Température interne

L'analyse de variance à mesures répétées réalisée pour les trois conditions standard (0,034 °C/min), MCP (0,032 °C/min) et contrôle (0,037 °C/min), n'a pas permis de détecter de différence significative pour le facteur condition ($p = 0,191$).

4.2.5 Perte hydrique

L'analyse de variance à mesures répétées réalisée pour les trois conditions standard (22,47 g/min), MCP (23,45 g/min) et contrôle (24,95 g/min) n'a pas permis de détecter de différence significative pour le facteur condition ($p = 0,404$).

4.2.6 Perception psychophysique

Comme la majorité des variables précédentes, la mesure de la perception psychophysique sur l'échelle de Borg, effectuée durant les tests, a été ramenée à une valeur comparable en divisant son augmentation (mesure finale moins la mesure initiale) par la durée d'exposition. L'analyse de variance à mesures répétées réalisée pour les conditions standard (0,147 Borg/min), MCP (0,151 Borg/min) et contrôle (0,164 Borg/min) n'a pas permis de détecter de différence significative pour le facteur condition ($p = 0,198$).

4.3 Analyse sur une base de temps uniforme pour le volet 1

La prochaine section présente les résultats analysés sur une base de temps uniforme. Une durée de 45 minutes a été retenue puisqu'elle correspond à la durée minimale ayant été effectuée, tous sujets et conditions confondus. Les données recueillies selon la condition (facteur condition = 3 niveaux) ont été analysées à trois intervalles de temps standardisés (facteur temps = 3 niveaux), dont le premier intervalle (15 minutes) représentait l'écart entre la moyenne de la première minute du test et celle de la quinzième minute, le deuxième intervalle (30 minutes) représentait l'écart entre la moyenne de la première minute du test et celle de la trentième minute, et le troisième intervalle (45 minutes) représentait l'écart entre la moyenne de la première minute et celle de la quarante-cinquième minute. Cette analyse en fonction d'un temps standardisé permettait de mieux faire ressortir les conditions où des différences significatives ont été obtenues.

4.3.1 Coût cardiaque relatif (CCR)

Malgré des valeurs plus basses observées lors des dernières minutes du test pour la condition MCP par rapport aux deux autres conditions (Figure 4.3), l'analyse de variance à mesures répétées n'a pas permis de déceler de différence significative pour le facteur condition ($p = 0,254$) et pour l'interaction des facteurs condition*temps ($p = 0,311$). Toutefois, une différence significative a été observée pour le facteur temps ($p = 0,000$).

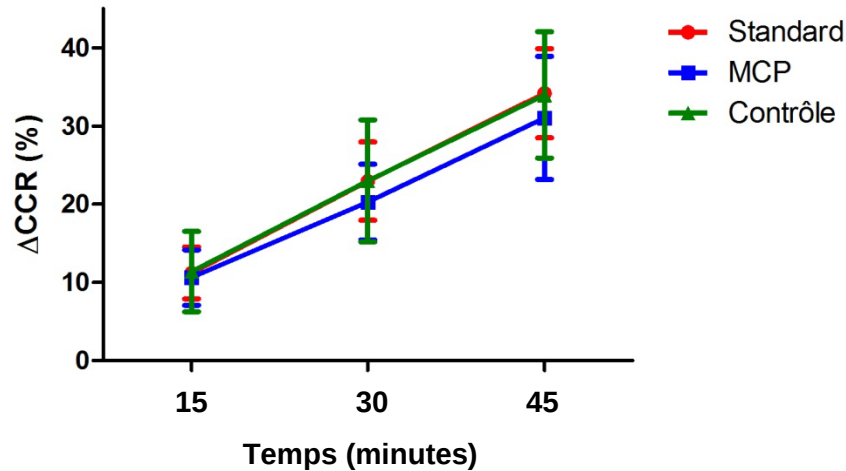


Figure 4.3 Variation du coût cardiaque relatif selon la condition évaluée et le temps écoulé depuis le début du test (moyenne et intervalle de confiance).

4.3.2 Température cutanée

La Figure 4.4 présente la variation de la température cutanée des sujets selon la condition évaluée et le temps. L'analyse de variance à mesures répétées a permis de déceler une différence significative pour le facteur condition ($p = 0,012$), le facteur temps ($p = 0,000$) et l'interaction des facteurs condition*temps ($p = 0,019$). Le Tableau 4.3 présente l'analyse statistique de comparaison par paire de cette variable selon le facteur condition. Ces résultats laissent voir une augmentation moins importante de la température cutanée pour la condition MCP comparativement aux conditions standard et contrôle.

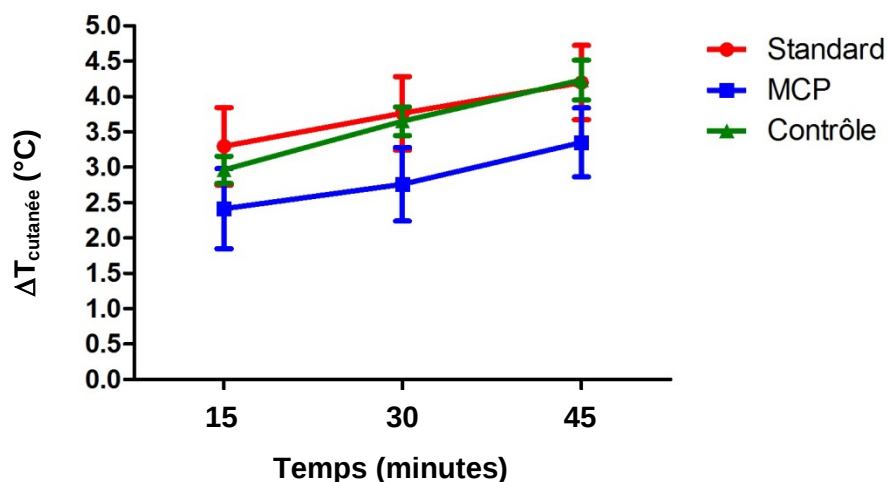


Figure 4.4 Variation de la température cutanée selon la condition évaluée et le temps écoulé depuis le début du test (moyenne et intervalle de confiance).

Tableau 4.3 Résultats des analyses statistiques de comparaison par paire pour la température cutanée selon la condition évaluée.

	Standard	MCP	Contrôle
Standard			
MCP	0.036*		
Contrôle	0.631	0.005*	

* $p < 0,05$

4.3.3 Température interne

La Figure 4.5 présente la variation de la température interne des sujets selon les différentes conditions évaluées. Les courbes semblent démontrer que la température interne augmente progressivement tout au long du test avant une augmentation plus importante après la trentième minute pour la condition contrôle.

La Figure 4.6 présente la variation de la température interne des sujets selon la condition évaluée et le temps. L'analyse de variance à mesures répétées n'a pas permis de percevoir une différence significative pour le facteur condition ($p = 0,534$), mais a toutefois décelé une différence significative pour le facteur temps ($p = 0,000$) et l'interaction entre les facteurs condition*temps ($p = 0,000$). On remarque une différence de la température interne entre les conditions contrôle et MCP seulement pour la dernière période (45 minutes).

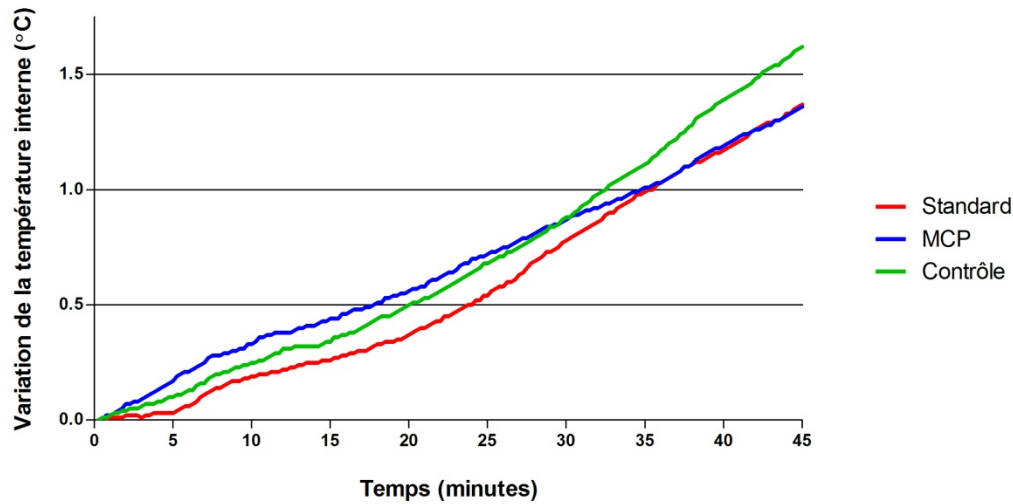


Figure 4.5 Variation de la température interne pour les trois conditions évaluées (moyenne de tous les sujets).

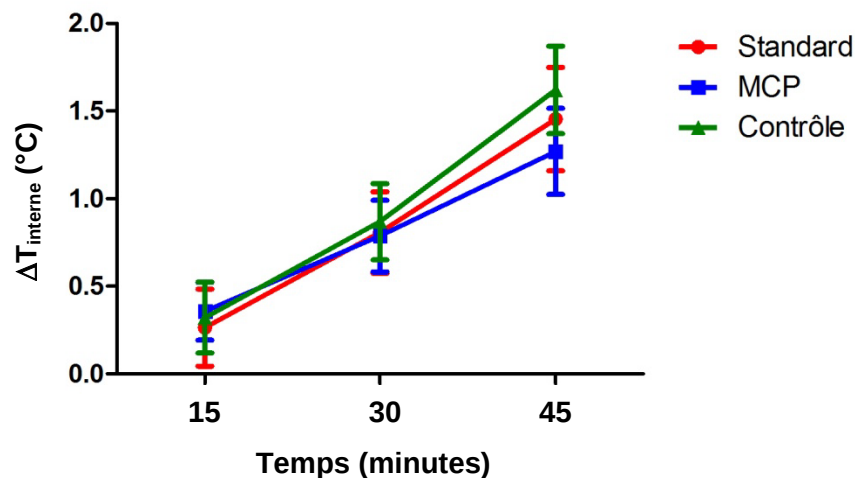


Figure 4.6 Variation de la température interne selon la condition évaluée et le temps écoulé depuis le début du test (moyenne et intervalle de confiance).

La différence significative obtenue pour l'interaction entre les facteurs condition*temps implique que la température interne n'augmente pas de la même manière selon la condition. À la Figure 4.7, les valeurs d'augmentation de la température interne ont été analysées pour démontrer sa progression à l'intérieur de chaque intervalle. Bien que les effets principaux ne soient pas significatifs, en analysant chacune des courbes individuellement selon le facteur temps, on observe une différence significative entre les valeurs d'augmentation de la température interne dans le temps pour les conditions standard et contrôle, alors qu'il n'y a pas de différence significative entre les valeurs d'augmentation de la température interne dans le temps pour la condition MCP. Ceci suppose que l'augmentation de la température interne pour la condition

MCP est restée stable tandis qu'elle a continué d'augmenter pour les deux autres. Le Tableau 4.4 présente l'analyse statistique de comparaison par paire de cette variable pour le facteur intervalle_temps selon chacune des conditions.

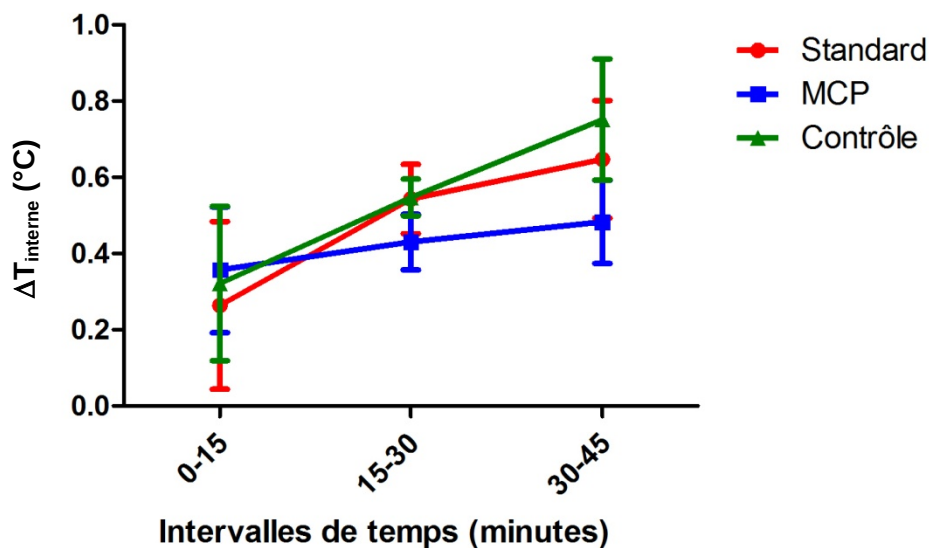


Figure 4.7 Hausse de la température interne de chaque intervalle de temps selon la condition évaluée (moyenne et intervalle de confiance).

Tableau 4.4 Résultats des analyses statistiques de comparaison par paire pour l'augmentation de la température interne des trois conditions selon le facteur intervalle_temps.

Condition	Facteur intervalle_temps			
		0-15	15-30	30-45
Standard	0-15			
	15-30	0,032*		
	30-45	0,005*	0,285	
MCP	0-15			
	15-30	0,287		
	30-45	0,178	0,204	
Contrôle	0-15			
	15-30	0,031*		
	30-45	0,007*	0,032*	

* $p < 0,05$

4.4 Analyse sur une base de temps uniforme pour le volet 2

4.4.1 Consommation d'oxygène (VO_2)

La Figure 4.8 présente l'évolution dans le temps de la consommation d'oxygène des sujets, selon la condition évaluée. La consommation d'oxygène augmentait rapidement durant les deux à trois premières minutes, puis atteignait un plateau qui se maintenait jusqu'à la fin du test. L'analyse de variance à mesures répétées pour le facteur condition n'a pas permis de déceler de différence significative. Ces résultats confirment que la charge métabolique était comparable pour les quatre conditions. Le VIP composé d'un matériau à double densité (DD) cause une charge mécanique similaire au VIP standard.

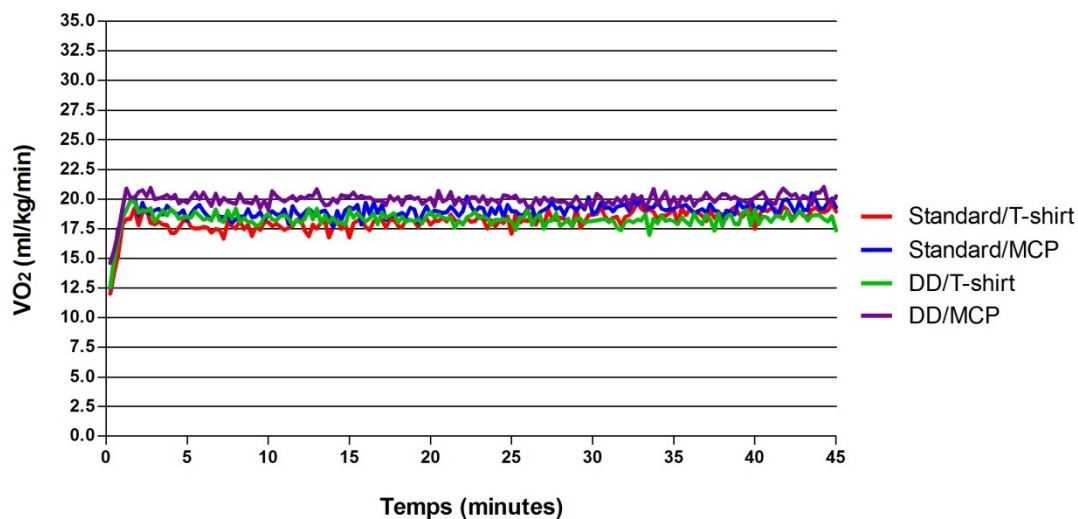


Figure 4.8 Consommation d'oxygène pour les quatre conditions évaluées (moyenne de tous les sujets).

4.4.2 Coût cardiaque relatif (CCR)

La Figure 4.9 présente le CCR des sujets selon les différentes conditions évaluées. Les courbes semblent démontrer que le CCR augmente progressivement tout au long du test, mais que les deux conditions avec les MCP progressent moins rapidement après la trentième minute d'évaluation.

La Figure 4.10 présente le CCR des sujets selon la condition évaluée et l'intervalle de temps. L'analyse de variance à mesures répétées a permis de déceler une différence significative pour le facteur condition ($p = 0,031$) et le facteur temps ($p = 0,000$), mais une différence non significative pour l'interaction entre les facteurs condition*temps ($p = 0,070$). Le Tableau 4.5 présente l'analyse statistique de comparaison par paire de différentes variables selon le facteur condition. Les résultats pour la variable du CCR semblent démontrer que la condition DD/MCP permet d'obtenir des valeurs de CCR significativement plus basses que les conditions DD/T-shirt et standard/T-shirt.

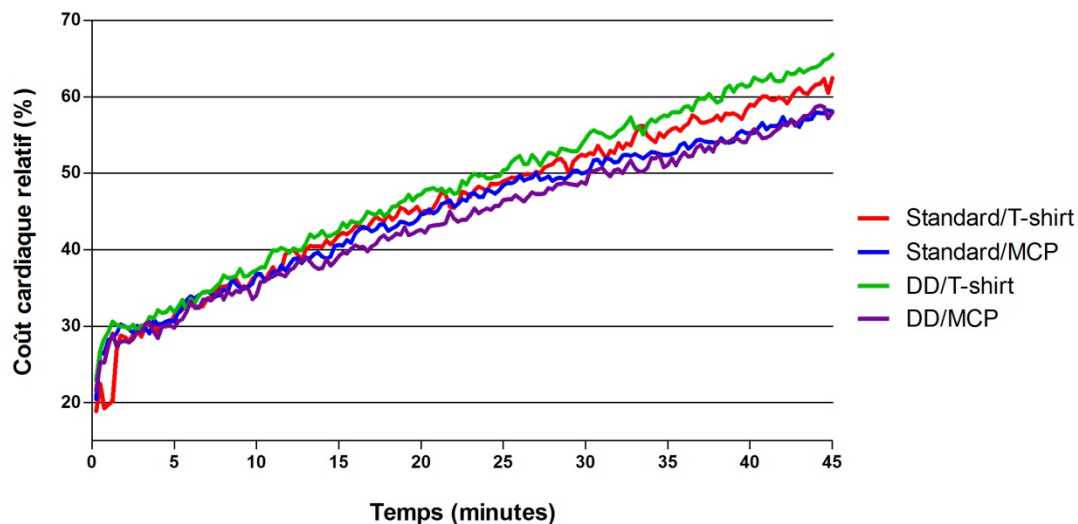


Figure 4.9 Coût cardiaque relatif pour les quatre conditions évaluées (moyenne de tous les sujets).

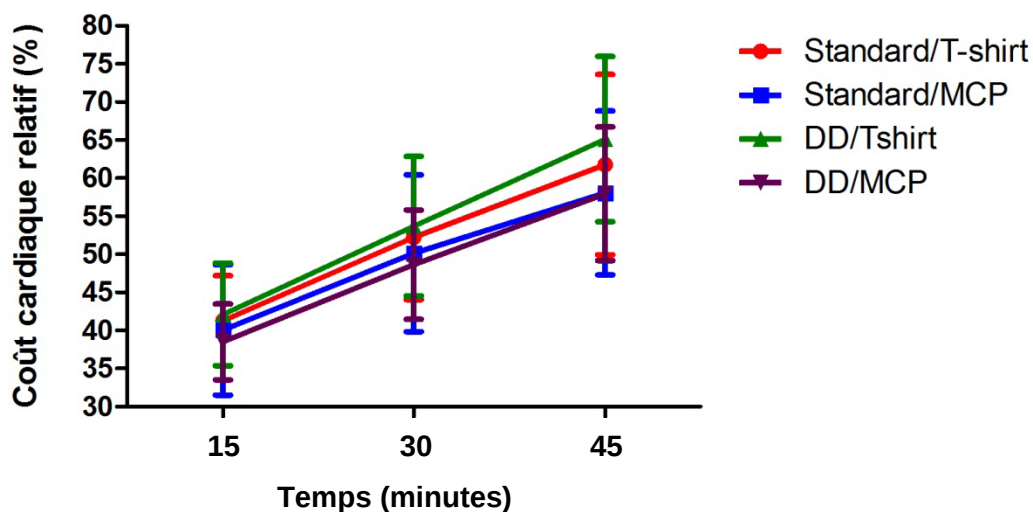


Figure 4.10 Coût cardiaque relatif selon la condition évaluée et le temps écoulé depuis le début du test (moyenne et intervalle de confiance).

Tableau 4.5 Résultats des analyses statistiques de comparaison par paire selon la condition pour les différentes variables mesurées.

Variable	Facteur condition				
		Standard/ T-shirt	Standard/ MCP	DD/ T-shirt	DD/ MCP
Coût cardiaque relatif	Standard/T-shirt				
	Standard/MCP	0,146			
	DD/T-shirt	0,369	0,109		
	DD/MCP	0,032*	0,525	0,026*	
Température cutanée	Standard/T-shirt				
	Standard/MCP	0,005*			
	DD/T-shirt	0,041*	0,000*		
	DD/MCP	0,002*	0,744	0,000*	
Température interne	Standard/T-shirt				
	Standard/MCP	0,126			
	DD/T-shirt	0,701	0,104		
	DD/MCP	0,003*	0,055	0,026*	
Perception psychophysique	Standard/T-shirt				
	Standard/MCP	0,539			
	DD/T-shirt	0,882	0,028*		
	DD/MCP	0,037*	0,036*	0,009*	
Température mesurée à l'intérieur du VIP	Standard/T-shirt				
	Standard/MCP	0,000*			
	DD/T-shirt	0,209	0,000*		
	DD/MCP	0,000*	0,699	0,000*	
Humidité relative mesurée à l'intérieur du VIP	Standard/T-shirt				
	Standard/MCP	0,000*			
	DD/T-shirt	0,236	0,000*		
	DD/MCP	0,001*	0,474	0,000*	

* $p < 0,05$

4.4.3 Température cutanée

La Figure 4.11 présente la température cutanée des sujets selon la condition évaluée et l'intervalle de temps. L'analyse de variance à mesures répétées permet de déceler une différence significative seulement pour les facteurs condition ($p = 0,000$) et temps ($p = 0,000$). L'interaction entre les facteurs condition*temps ne présente pas de valeur significative ($p = 0,077$). L'analyse statistique de comparaison par paire de cette variable selon le facteur condition semble démontrer que la condition DD/T-Shirt entraîne des valeurs de température cutanée significativement plus hautes que les conditions où les MCP sont utilisés (Tableau 4.5).

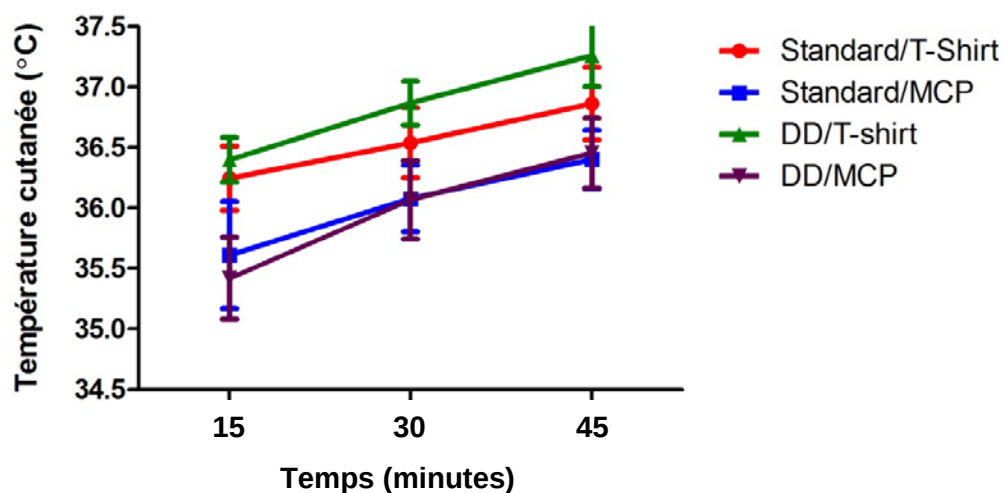


Figure 4.11 Température cutanée selon la condition évaluée et le temps écoulé depuis le début du test (moyenne et intervalle de confiance).

4.4.4 Température interne

La Figure 4.12 présente la température interne moyennée des sujets selon les différentes conditions évaluées et le temps. Les courbes semblent démontrer que la température interne augmente progressivement tout au long du test et que la condition DD/MCP permet de conserver les valeurs les plus basses durant les 45 minutes qu'ont duré les tests.

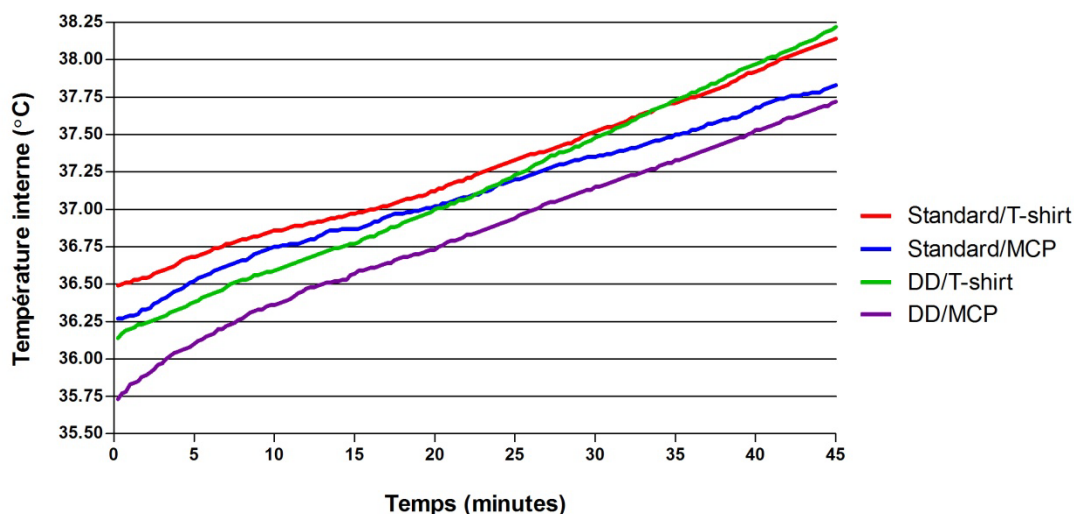


Figure 4.12 Température interne pour les quatre conditions évaluées (moyenne de tous les sujets).

La Figure 4.13 présente la température interne des sujets selon la condition évaluée et l'intervalle de temps. L'analyse de variance à mesures répétées a permis de déceler une différence significative pour le facteur condition ($p = 0,006$), le facteur temps ($p = 0,000$) et l'interaction entre les facteurs condition*temps ($p = 0,000$). L'analyse statistique de comparaison par paire pour le facteur condition semble indiquer que la condition DD/MCP permet de conserver des valeurs plus basses de la température interne par rapport aux conditions DD/T-shirt et standard/T-shirt (Tableau 4.5).

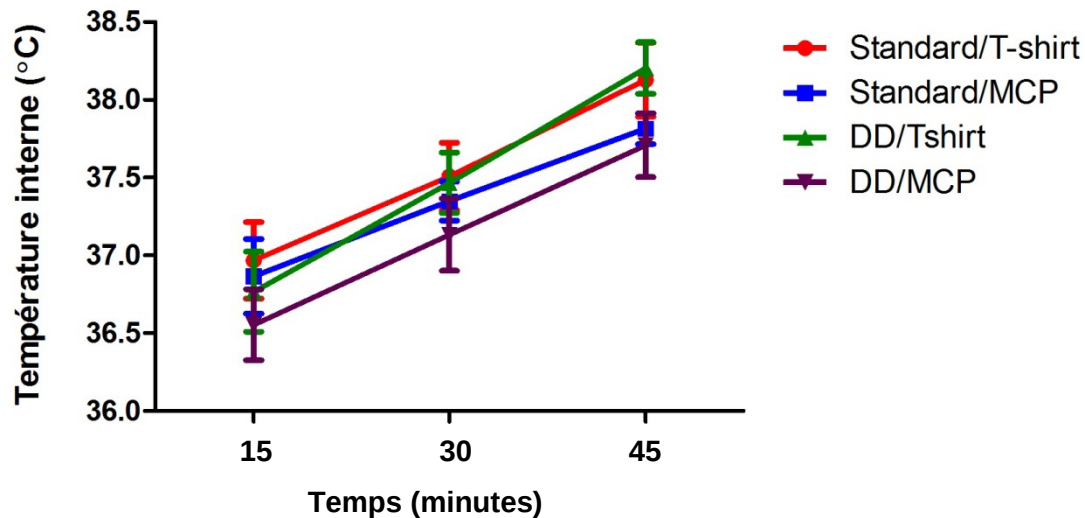


Figure 4.13 Température interne selon la condition évaluée et le temps écoulé depuis le début du test (moyenne et intervalle de confiance).

4.4.5 Perte hydrique

La Figure 4.14 présente la variation dans le temps de la perte hydrique moyennée des sujets selon la condition évaluée. L'analyse de variance à mesures répétées n'a pas permis de déceler une différence significative pour le facteur condition ($p = 0,128$). La condition DD/T-shirt obtient la plus haute valeur avec 22,53 g/min alors que le même VIP combiné avec les MCP (DD/MCP) donne la plus basse valeur avec 19,86 g/min. Toutefois, lorsque l'on combine les deux conditions avec MCP et les deux sans MCP (T-shirt), l'analyse de variance à mesures répétées donne une différence significative entre ces deux conditions ($p = 0,037$). Les conditions avec les MCP donnent une moyenne de 19,88 g/min et celles avec le T-shirt de 21,98 g/min. Ceci semble indiquer que l'utilisation des MCP diminue la perte hydrique.

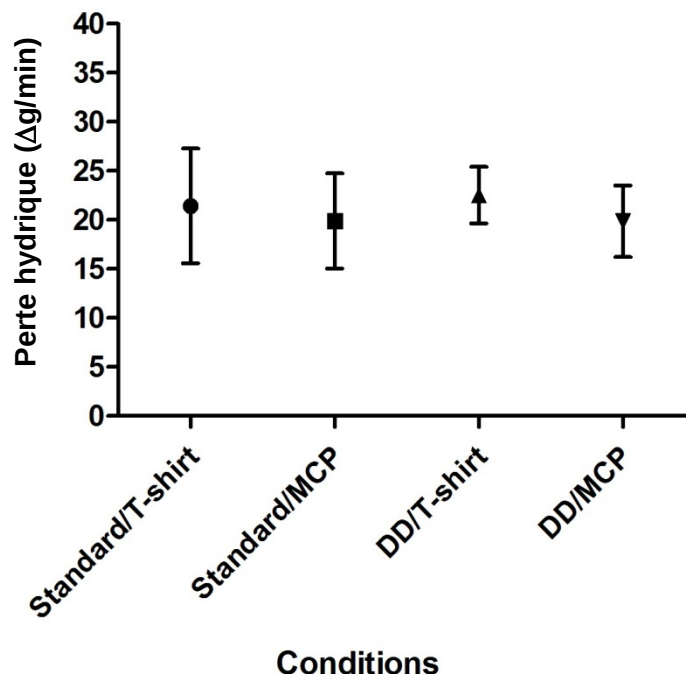


Figure 4.14 Variation dans le temps de la perte hydrique mesurée selon la condition (moyenne et intervalle de confiance).

4.4.6 Perception psychophysique

La Figure 4.15 présente la perception psychophysique des sujets selon la condition évaluée et l'intervalle de temps. L'analyse de variance à mesures répétées a permis de déceler une différence significative pour le facteur condition ($p = 0,022$) et le facteur temps ($p = 0,000$), et non significative pour l'interaction entre les facteurs condition*temps ($p = 0,475$). La condition DD/MCP présente des valeurs moins élevées pour les deux dernières périodes. L'analyse statistique de comparaison par paire de cette variable pour le facteur condition semble démontrer que la condition DD/MCP cause une baisse significative de la perception psychophysique par rapport aux trois autres conditions (Tableau 4.5).

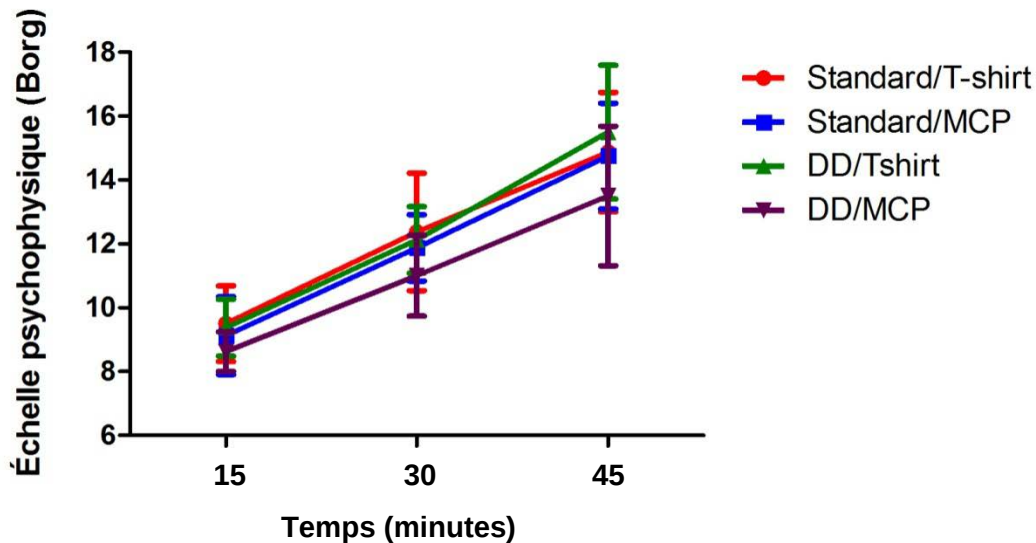


Figure 4.15 Cotes psychophysiques mesurées selon la condition et le temps écoulé depuis le début du test (moyenne et intervalle de confiance).

4.4.7 Température à l'intérieur du VIP

La Figure 4.16 présente la température dans le VIP des sujets selon les différentes conditions évaluées. Les courbes démontrent que les conditions avec l'usage des MCP permettent de réduire la température dans le vêtement d'environ 5 °C pour la durée complète du test.

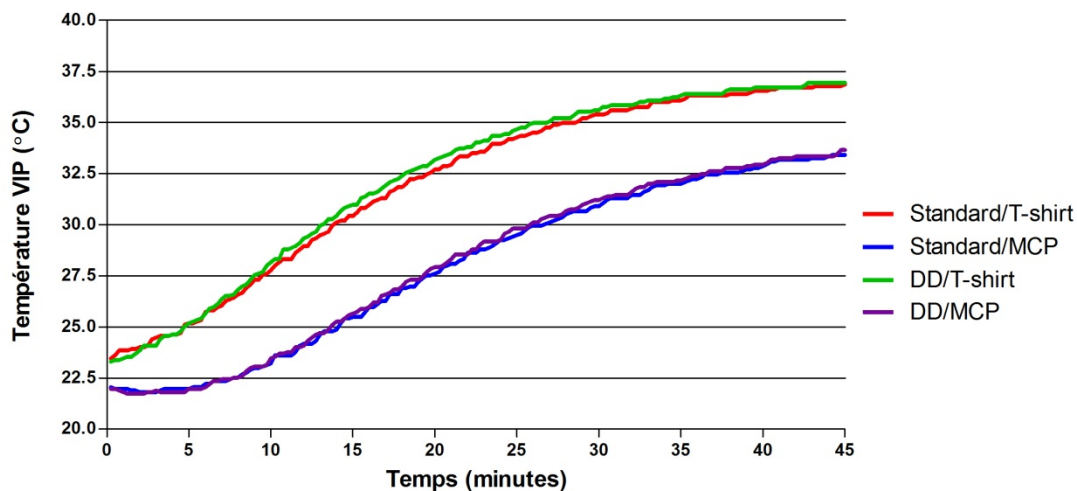


Figure 4.16 Température mesurée à l'intérieur du VIP pour les quatre conditions évaluées (moyenne de tous les sujets).

La Figure 4.17 présente la température dans le VIP des sujets selon la condition évaluée et l'intervalle de temps. L'analyse de variance à mesures répétées a permis de déceler une différence significative pour le facteur condition ($p = 0,000$), le facteur temps ($p = 0,000$) et l'interaction entre les facteurs condition*temps ($p = 0,000$). L'analyse statistique de comparaison par paire de cette variable pour le facteur condition semble montrer que le port de la veste avec les MCP induit une baisse de température similaire pour les deux VIP (DD et Standard) (Tableau 4.5). Autrement dit, le type de VIP utilisé n'influence pas significativement la température à l'intérieur du VIP. C'est plutôt le port ou non de la veste MCP qui produit des différences.

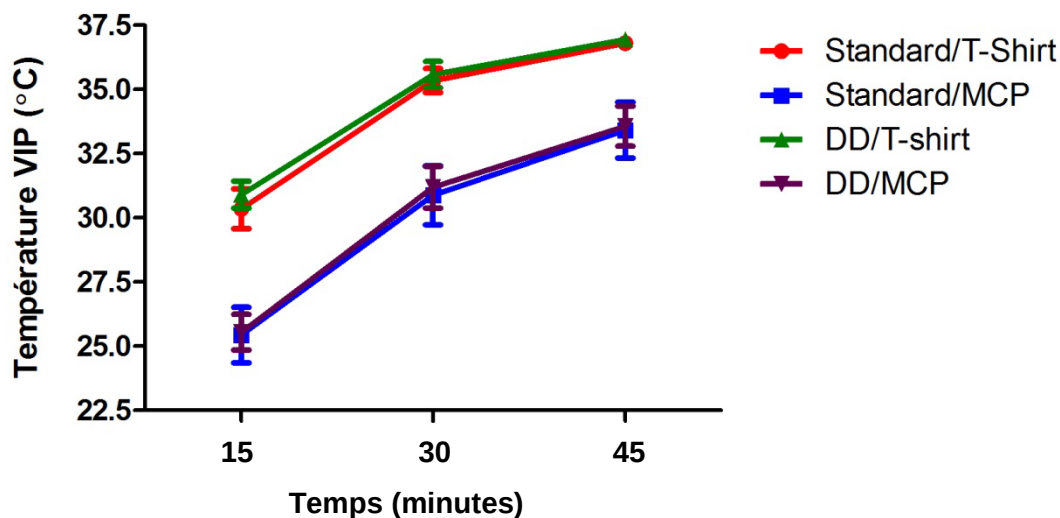


Figure 4.17 Températures mesurées à l'intérieur du VIP selon la condition et le temps écoulé depuis le début du test (moyenne et intervalle de confiance).

4.4.8 Humidité relative à l'intérieur du VIP

La Figure 4.18 illustre l'humidité relative dans le VIP des sujets selon les différentes conditions évaluées. Les courbes démontrent une tendance similaire à celle obtenue pour l'analyse de la température interne dans le VIP, à savoir que les conditions MCP permettent de réduire l'humidité relative dans le vêtement d'environ 17 % pour la durée complète du test.

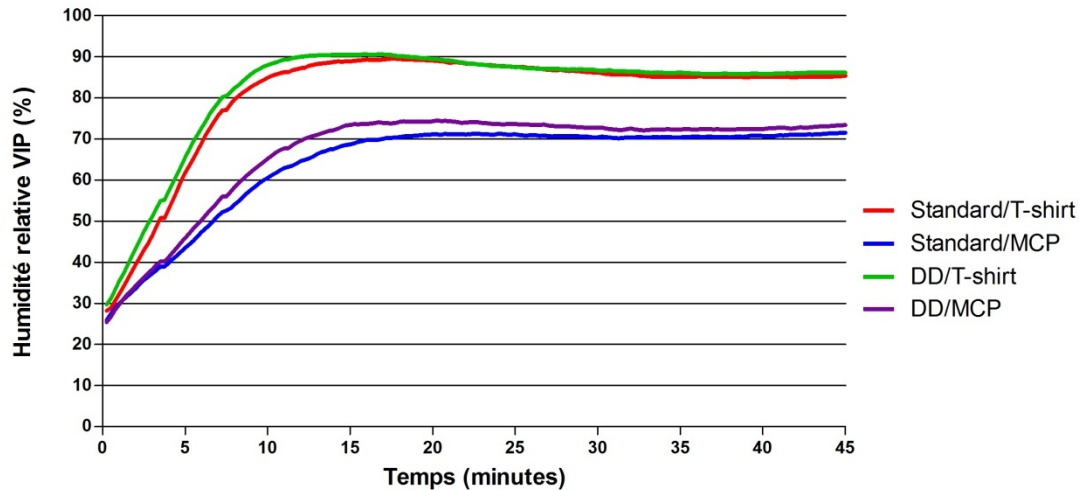


Figure 4.18 Taux d'humidité relative mesuré à l'intérieur du VIP pour les quatre conditions évaluées (moyenne de tous les sujets).

La Figure 4.19 présente les valeurs de l'humidité relative dans le VIP moyennées des sujets selon la condition évaluée et l'intervalle de temps. L'analyse de variance à mesures répétées a permis de déceler une différence significative pour le facteur condition ($p = 0,000$) et l'interaction entre les facteurs condition*temps ($p = 0,000$), ainsi qu'une différence non significative pour le facteur temps ($p = 0,126$). L'analyse statistique de comparaison par paire de cette variable pour le facteur condition semble démontrer que le port de la veste avec les MCP cause une baisse de l'humidité relative pour les deux VIP (DD et standard), mais que le type de VIP, lui, n'a aucune influence (Tableau 4.5).

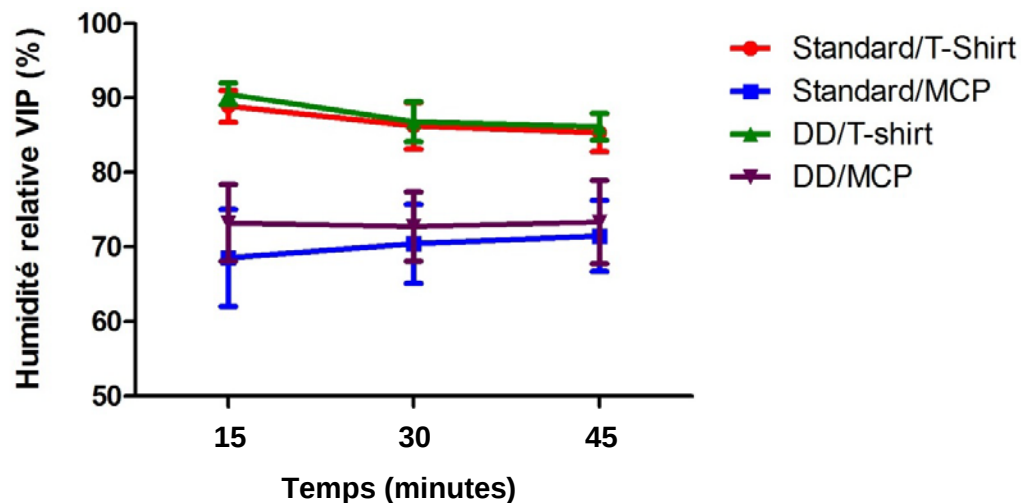


Figure 4.19 Taux d'humidité relative mesurés à l'intérieur du VIP, selon la condition évaluée et le temps écoulé depuis le début du test (moyenne et intervalle de confiance).

5. DISCUSSION

L'objectif de cette activité de recherche était d'évaluer si les nouvelles technologies de matériaux utilisées dans la fabrication des systèmes d'absorption de la chaleur et de l'humidité et la confection des VIP permettaient de réduire les astreintes physiologiques de sujets exposés au stress thermique. Pour être en mesure d'isoler les effets qui sont uniquement attribuables aux différentes technologies utilisées, des tests comparatifs ont été réalisés dans un environnement climatique contrôlé avec un effort musculaire constant. Les mesures de contrôle associées à la chambre climatique démontrent que la température et l'humidité relative sont demeurées constantes pour toutes les conditions expérimentales. En ce qui a trait à l'effort musculaire imposé par le tapis roulant, les résultats des analyses statistiques laissent voir que la consommation d'oxygène dans les deux volets de l'étude demeure relativement stable d'une condition à l'autre pour l'ensemble des sujets. La stabilité démontrée de ces paramètres environnementaux et de la charge de travail suggère que les différences significatives mesurées proviennent principalement de l'impact des différentes conditions expérimentales évaluées et de leurs effets sur les processus de thermorégulation du corps humain.

5.1 Volet 1

Ce volet visait principalement à évaluer l'impact de l'introduction des matériaux à changement de phase pour une veste portée à l'intérieur d'un VIP standard. Puisque ces matériaux sont conçus de manière à absorber une partie de la chaleur dégagée par le corps et à diminuer la chaleur accumulée dans le VIP, il semblait envisageable d'observer une baisse des astreintes thermophysiques et cardiorespiratoires. Par conséquent, les effets positifs de l'utilisation des MCP devaient se manifester en influant sur ces variables : la température cutanée, la température interne et la fréquence cardiaque. Ces variables avaient permis, dans des études antérieures, de mesurer l'importance des astreintes physiques et physiologiques auxquelles sont soumis les pompiers lors de leur travail (Sköldström, 1987; Faff et Tutak, 1989; Ftaiti et coll., 2001; Griefahn et coll., 2003).

Sur l'ensemble des variables mesurées, l'analyse selon la méthode ASTM 2300-10 n'a pas permis de faire ressortir de différence significative entre les trois conditions étudiées, à l'exception de la température cutanée. En effet, l'analyse des variations dans le temps de la température cutanée a démontré que le port des MCP permet de ralentir son augmentation durant toute la durée du test (voir Figure 4.2). Les résultats démontrent que la condition MCP engendre la plus faible augmentation de la température cutanée dans le temps avec une valeur de 0,067 °C/min comparativement à 0,075°C/min pour la condition standard et de 0,083 °C/min pour la condition contrôle. Considérant qu'une température cutanée de 38 °C atteint déjà un seuil limite (Tattersall et Thomas, 1985) et considérant une température cutanée initiale moyenne de 33,05 °C chez l'ensemble des sujets, on constate que les MCP permettent de retarder l'atteinte du seuil limite de la température cutanée de huit minutes par rapport à la condition standard et de 14 minutes par rapport à la condition contrôle.

En observant les résultats des analyses sur une base de temps uniforme, la condition MCP permet une augmentation moins importante de la température cutanée que les deux autres conditions (voir Figure 4.4). Cet effet, très présent pour les 30 premières minutes, semble encore l'être jusqu'à la 45^e minute, alors que l'on observe encore une différence significative entre les valeurs

moyennes d'augmentation de la température cutanée des conditions standard (4,20 °C) et contrôle (4,24 °C) et celle de la condition MCP (3,35°C). Ces observations semblent suggérer que les MCP ont un effet refroidissant modeste et principalement efficace lors des premières minutes d'utilisation. Toutefois, bien que limité, cet effet semble être bénéfique à long terme grâce à l'écart de température acquis durant les premières minutes. Ces résultats viennent confirmer les conclusions de plusieurs études portant sur des vestes fournissant un refroidissement local appliqué directement à la surface cutanée des sujets (Bennett et coll., 1995; Cotter et coll., 2001; Webster et coll., 2005).

Un des aspects plus méconnus de la thermorégulation demeure le lien entre la température cutanée et la température interne lors d'une exposition en ambiance thermique chaude. Bien que les mécanismes physiologiques associés à ce type d'exposition (sudation, vasodilatation) soient bien recensés dans la littérature, très peu d'études s'attardent au délai temporel et à l'influence entre l'augmentation de la température cutanée et la variation de la température interne associée lors d'une transition rapide entre un milieu ambiant neutre (~22 °C) et un environnement chaud (~35°C). Dans une étude publiée en 2002, Iwase et ses collègues ont quantifié le temps nécessaire pour produire une modification significative de la température interne lors de l'augmentation progressive de la température ambiante. Selon cette étude, une inhibition significative de l'activité sympathique vasoconstrictrice se produit en moyenne dans les 7,7 minutes suivant l'augmentation de la température ambiante.

Dans la présente étude, ce délai temporel s'observe pour la condition standard où la température interne présente très peu de variations pour les cinq premières minutes (voir Figure 4.5). Pour la condition MCP, on observe une augmentation importante de la température interne pendant cette période et jusqu'à la douzième minute du test. Il semble que la présence du froid transmis à la peau par les MCP cause un effet de vasoconstriction du système sanguin périphérique qui hausse la température interne à court terme. Cette hypothèse de vasoconstriction pourrait expliquer la raison pour laquelle, durant les 15 premières minutes du test, la température interne a augmenté plus rapidement pour la condition MCP que les conditions standard et contrôle. Bien qu'initialement cet effet semble néfaste, le refroidissement de la température cutanée que procurent les MCP permet, à long terme, une augmentation moins importante de la température interne qui concorde avec les résultats obtenus dans des études similaires (Chou. et coll., 2008; Gao et coll., 2011a,b). En effet, la valeur d'augmentation de la température interne du bloc 0 à 15 minutes pour la condition MCP n'est pas significativement différente de celle des deux autres blocs de temps (voir Figure 4.7). Autrement dit, l'augmentation de la température interne reste constante sur l'ensemble de la durée d'exposition. À l'inverse, pour les conditions standard et contrôle, il y a une différence significative entre les valeurs d'augmentation de la température interne du bloc de temps 0-15 minutes comparativement à celles des blocs de temps 15-30 minutes et 30-45 minutes. Ceci implique une augmentation de la température interne qui s'accélère avec la durée d'exposition. Considérant que sur 21 conditions, un peu plus de la moitié des arrêts ont été causés par une température interne trop élevée (12 arrêts sur 21 conditions, voir Tableau 4.1), ces résultats démontrent l'importance des MCP, qui permettent de ralentir l'augmentation de la température interne en absorbant la chaleur produite par le sujet. Toutefois, il est important de mentionner que la veste utilisée ne pouvait pas être en contact direct avec le corps étant donné l'inconfort produit par la friction du tissu sur la peau. La présence d'un vêtement de corps en coton (T-shirt) a pu interférer en causant une isolation supplémentaire et une mouillure cutanée importante, nuisant ainsi à l'évaporation de la sueur.

Malgré la différence de température mesurée sur la peau, la fréquence cardiaque n'a pas démontré de différence significative d'une condition à l'autre. Bien que la condition MCP présente une augmentation moins importante du coût cardiaque relatif (CCR), il est possible que l'effet de refroidissement de la température cutanée n'ait pas été assez important pour engendrer une baisse de l'effet thermorégulateur de la fréquence cardiaque.

La durée d'exposition n'a pas démontré de différence significative d'une condition à l'autre, bien que la condition MCP (63,21 minutes) ait permis une durée légèrement supérieure en moyenne à celles obtenues lors des conditions standard (59,00 minutes) et contrôle (55,93 minutes). Il semble que l'élément « motivation » ou « acceptation » de la souffrance physique imposée par les conditions expérimentales ait influencé la durée des tests pour les arrêts volontaires.

Les résultats observés pour ce volet 1 de l'étude semblent concorder avec ceux d'études antérieures (Carter et coll., 2007; Gao et coll., 2007; Chou et coll., 2008; Gao et coll., 2011a) stipulant que les matériaux à changement de phase, utilisés comme substance refroidissante dans une situation de chaleur importante, ont un effet significatif sur la température cutanée, mais moins d'influence sur les autres paramètres physiologiques importants tels que la fréquence cardiaque et la température interne.

Toutefois, les résultats de ce premier volet remettent en cause le fait que le temps ne soit pas standardisé avec la méthode ASTM F2300-10 lorsqu'il s'agit de comparer plusieurs conditions d'habillement. La méthode stipule que des analyses de variance à mesures répétées devraient être effectuées sur la valeur finale d'une variable donnée. Ainsi, puisque l'arrêt des conditions était souvent déterminé par un critère physiologique (majoritairement $T^{\circ}_{int} > 39^{\circ}\text{C}$), il devenait très difficile de démontrer une différence significative entre deux sujets ayant atteint ce critère d'arrêt à la suite de deux durées d'exposition très différentes. De plus, cette situation a conduit à des niveaux élevés de stress thermique chez les sujets pour lesquels des valeurs de déshydratation ont, dans certains cas, dépassé 3 % du poids total du corps.

5.2 Volet 2

Ce volet visait à évaluer principalement l'efficacité d'un nouveau matériau double densité utilisé dans la confection d'un VIP, et de comparer ce nouveau VIP à un habit de pompier standard. Souple et extensible, ce nouveau VIP devait permettre de réduire la résistance aux mouvements causée par un assemblage plus rigide tel que celui d'un VIP standard. Ces deux VIP ont aussi été évalués avec et sans l'utilisation de MCP contenu dans une nouvelle veste, conçue en appliquant les résultats obtenus lors du volet 1. Cette veste devait permettre un meilleur transfert thermique entre la peau et les MCP. Pour ce volet lors duquel l'analyse statistique des résultats s'est faite uniquement sur la base de temps uniforme à l'intérieur des 45 premières minutes du test sur tapis roulant, plusieurs différences significatives ont été mesurées entre les conditions étudiées.

Au regard de la consommation d'oxygène, le port du VIP double densité n'a pas démontré de réduction significative de la demande d'énergie et n'a pas, par conséquent, modifié les contraintes mécaniques musculaires ou articulaires (voir Figure 4.8). La maniabilité des matériaux qui le constitue ne semble pas influencer les mesures physiologiques de la charge de travail. Concernant le design, le pantalon du VIP-DD n'avait pas de plis à la hauteur du genou, ce qui ne favorisait pas la flexion du genou. Il est important de considérer que l'aisance de mouvement que

l'on obtient dans des vêtements dont certaines couches sont moins extensibles est fortement influencée par la taille et le design de ceux-ci, car les articulations sont principalement sollicitées lors de mouvements répétitifs.

En matière d'astreintes thermophysiques, la condition DD/MCP a permis de réduire significativement le CCR et donc d'avoir un effet positif sur la thermorégulation. Toutefois, cet effet favorable serait associé uniquement à l'interaction produite par ces deux facteurs (DD et MCP) puisque la condition DD/T-shirt cause l'augmentation la plus importante du CRR (voir Figure 4.10). Ce résultat a également été observé dans le cas de la température cutanée pour laquelle la condition DD/T-shirt obtient des valeurs significativement supérieures à celles des trois autres conditions (voir Figure 4.11). Sans la présence de MCP, le VIP à double densité cause une augmentation de la température cutanée supérieure à celle du VIP standard. Avec les MCP, les deux VIP deviennent comparables et permettent d'abaisser efficacement la température cutanée. La présence des MCP a aussi un impact sur la température interne puisque la combinaison DD/MCP permet d'obtenir un abaissement des valeurs par rapport aux autres conditions évaluées (voir Figure 4.13). Le matériau double densité semble produire un effet d'isolation qui devient avantageux seulement lorsque les MCP sont présents à l'intérieur du vêtement. En interaction avec sa membrane humidifuge, il semble agir comme un contenant isolant qui permet de maintenir une température interne basse seulement lorsqu'un élément cryogène est présent à l'intérieur du VIP. L'inverse se produit en l'absence des MCP, lorsque la température interne du corps devient importante, en conservant davantage la chaleur à l'intérieur du VIP.

Si la veste contenant les MCP agit favorablement sur la température interne, elle permet aussi de réduire la perte hydrique et d'influencer significativement la perception des utilisateurs. En effet, les sujets perçoivent la condition DD/MCP comme étant la moins contraignante (voir Figure 4.15) avec des résultats similaires à ceux obtenus pour la température interne.

Avec la veste utilisée dans le volet 1, la présence des MCP n'a pas eu autant d'effets sur la température interne et n'a pas influencé significativement la fréquence cardiaque par rapport aux autres conditions. La seule présence des MCP dans le VIP n'explique pas l'ensemble des effets obtenus dans le volet 2. Il semble que le port de la veste directement sur la peau (sans l'interférence d'un T-shirt), le design plus moulant de la veste et l'utilisation d'un matériau plus conducteur pour la veste permettent un meilleur échange thermique avec la peau. Ce qui démontre que la qualité du contact avec la peau ne doit pas être négligée pour obtenir un effet de conduction plus marqué entre les MCP et le corps des utilisateurs (Martinet et Meyer, 1999).

Dans le volet 2, les mesures complémentaires de la température et de l'humidité relative à l'intérieur des VIP permettent vraiment de comprendre l'effet de l'utilisation des MCP. Lors du port d'un VIP, McLellan et ses collaborateurs (1993) ont observé la présence d'un microclimat à l'intérieur du vêtement qui entraverait la dissipation de la chaleur par évaporation. Si la température à l'intérieur des VIP est suffisamment importante pour influencer les processus physiologiques associés à la thermorégulation, la présence des MCP permet de la réduire de 5 °C (voir Figure 4.17). Cette baisse permet de conserver, pendant toute la durée du test, une température inférieure à 35 °C à l'intérieur du VIP, favorisant ainsi l'échange thermique par rayonnement et par convection, malgré un déplacement d'air minime à l'intérieur de l'habit (Nielsen et coll., 1988). Pour les conditions sans MCP lors desquelles la température à

l'intérieur du VIP excède 35 °C après 27 minutes d'effort, l'échange de chaleur se ferait plutôt de l'environnement immédiat vers le corps et nuirait aux processus de thermorégulation. Donc, le port du VIP favorise la formation d'un microclimat duquel la température élevée empêche une perte de chaleur par convection, causant ainsi une hausse rapide et importante des températures (Wang et coll., 2013, McEntire et coll., 2013). Pour cette situation, il ne reste principalement que le mécanisme de dissipation de la chaleur par évaporation pour permettre le refroidissement du corps. Le problème est que ce mécanisme est fortement influencé par la saturation de l'air ambiant en humidité qui devient généralement très élevée à l'intérieur de ce type de VIP.

Les MCP permettent de réduire l'humidité relative d'environ 17 % à l'intérieur des VIP (voir Figure 4.19). Cette baisse de l'humidité relative est très importante puisqu'elle améliore l'efficacité de la perte de chaleur par évaporation (Nielson et coll., 1997). Il est important de considérer que plus l'humidité relative est élevée, plus la capacité de l'air ambiant à absorber de l'eau est diminuée, rendant ainsi l'évaporation de la chaleur de moins en moins efficace. Pour les conditions sans MCP, l'humidité relative à l'intérieur des VIP est très élevée (plus de 85 % après 10 minutes d'effort) et l'évaporation de la chaleur devient très difficile. Bien que la quantité de sueur mesurée pour ces conditions sans MCP soit plus importante, elle entraîne peu de pertes de chaleur en présence d'une humidité relative aussi élevée et peut mener à l'hyperthermie. Selon Nielsen et ses collaborateurs (1997), ce n'est pas la quantité de sueur produite, mais bien son évaporation qui permet à la peau de se refroidir.

En effet, bien que la consommation d'oxygène (variable qui représente bien la charge physique imposée) demeure relativement stable pour la durée des différents tests, la fréquence cardiaque augmente continuellement sur une période d'activité de 45 minutes. Cette dissociation entre ces deux mesures de la charge cardiorespiratoire démontre bien l'impact du stress thermique prolongé sur la fréquence cardiaque. Les fréquences élevées obtenues vers la fin des tests démontrent clairement les risques associés à la présence du microclimat pour les utilisateurs. Les valeurs élevées de chaleur et d'humidité relative rendent les processus de thermorégulation inefficaces, ce qui augmente les risques de problèmes cardiaques.

6. LIMITES DE L'ÉTUDE

Cette activité de recherche visait à évaluer l'impact de l'utilisation de nouvelles technologies permettant de réduire les astreintes thermophysiques lors du travail en environnement chaud. Pour réaliser cette évaluation comparative des différents équipements, qui devaient permettre un refroidissement du corps (vestes avec les MCP) ou une réduction de la production de chaleur liée à une contrainte mécanique moins élevée (VIP à double densité), la méthode d'essai normalisée ASTM F2300-10 a été utilisée afin de standardiser les mesures en suivant un protocole expérimental reconnu pour l'évaluation des systèmes de refroidissement. Les résultats obtenus se limitent donc au travail à des températures chaudes avoisinant les 35 °C avec une humidité relative de près de 50 %.

Bien que la méthode d'essai ASTM F2300-10 semble efficace pour évaluer les variations des différents indicateurs d'astreintes physiologiques lors de l'évaluation d'un seul équipement sur une période prolongée, elle semble moins appropriée lorsqu'il s'agit de comparer différentes technologies. D'abord, l'application des critères d'arrêt suggérés par cette méthode a donné lieu à des variations importantes de la durée des essais entre les conditions expérimentales étudiées et entre les sujets. Avec ces variations temporelles, il était indispensable que l'analyse des données se fasse à partir des variations des mesures relatives pour être comparable d'une condition à l'autre, ce que suggère d'ailleurs la méthode ASTM F2300-10. Toutefois, un temps d'expérimentation trop long dans des conditions de chaleur élevée ne semblait pas seulement affecter les indicateurs physiologiques, mais aussi la motivation des sujets. Dans le volet 1, plusieurs des arrêts étaient volontaires chez les sujets. Une partie des abandons était possiblement associée à la charge de 250 Watts qui était imposée à tous les sujets lors des essais. Bien que les sujets aient une bonne condition physique, cette charge tenait compte uniquement de leur poids et non de leur capacité cardiorespiratoire évaluée lors des tests de la consommation d'oxygène maximale. Une charge de travail représentant un certain pourcentage de leur VO_2 max aurait probablement assuré une meilleure constance pour la durée des essais d'un sujet à l'autre. C'est principalement pour cette raison que le temps du volet 2 fut standardisé, afin de permettre aux sujets de réussir toutes les conditions expérimentales et de favoriser leur motivation à participer à l'étude.

La méthode d'essai ASTM F2300-10 ne suggère pas d'évaluer l'influence du microclimat qui est présent à l'intérieur des VIP et souvent très différent des contraintes environnementales imposées par la chambre climatique. C'est en prenant en compte les commentaires des participants au volet 1, qui révélaient l'importance des variations du microclimat à l'intérieur des VIP durant les essais, que des mesures additionnelles de température et d'humidité relative à l'intérieur des VIP ont été prises lors du volet 2. Ces mesures ont permis de faire une évaluation plus juste des contraintes environnementales qui affectent les sujets et leur processus de thermorégulation.

Bien que les vêtements aient été faits sur mesure pour les participants et que le design des VIP standards et des VIP double densité devait être identique, de légères différences ont été observées. Par exemple, pour le VIP double densité, il n'y avait pas de couture permettant de préformer la courbe du pantalon à la hauteur du genou pour rendre sa flexion plus facile. Outre le poids et la malléabilité des matériaux utilisés pour la conception des VIP, une attention particulière devrait être accordée au design pour assurer une aisance des mouvements articulaires des épaules, des coudes, des hanches et des genoux.

7. CONCLUSION

Un des objectifs de cette étude était d'évaluer l'efficacité d'un **système d'absorption de la chaleur composé de matériaux à changement de phase (MCP)** intégré à une veste portée sous un vêtement de pompier et de documenter ses effets sur la réponse physiologique associée au travail en ambiance chaude.

Le volet 1 a permis d'évaluer l'efficacité du premier prototype de veste confectionné à l'aide d'un dossard en tulle de nylon et porté par-dessus un T-shirt de coton, sous un VIP standard. L'analyse sur une base de temps uniforme a permis d'observer des effets significatifs pour la température cutanée, qui était inférieure pour la condition MCP, ainsi que pour l'augmentation de la température interne, qui progressait moins rapidement que pour les deux autres conditions, standard et contrôle. Par l'analyse selon la méthode ASTM F2300-10, les effets sur la fréquence cardiaque, la déshydratation et la durée d'exposition n'ont pas pu être établis de manière significative et la perception psychophysique des sujets n'a pas semblé favoriser la condition MCP au regard du confort ressenti. Pour l'évaluation des VIP des pompiers, il semble qu'un délai d'une heure soit suffisant pour mesurer les astreintes physiologiques associées à ce type de vêtement sous une température ambiante de 35 °C.

Le volet 2 a permis d'évaluer l'efficacité d'un deuxième prototype de veste contenant les MCP, fabriqué d'un tissu extensible et conducteur, et porté directement sur la peau (à la place du T-shirt de coton), sous un VIP. L'utilisation des MCP avec ce prototype amélioré démontre une influence positive sur l'ensemble des variables associées au processus de la thermorégulation. En effet, les MCP permettent d'abaisser efficacement la température cutanée, et ce, pour les deux VIP (standard et DD). Ils ont aussi un impact sur la température interne puisque la combinaison DD/MCP permet d'obtenir un abaissement des valeurs par rapport aux autres conditions évaluées. Ainsi, l'efficacité des MCP semble dépendre grandement de la conception de la veste. Les résultats semblent montrer que, pour être performante, la veste doit permettre de maintenir les MCP près du corps en utilisant des éléments ajustables et élastiques ainsi que des matériaux conducteurs qui assurent le transfert de chaleur par la peau des utilisateurs. Le port de la veste directement sur la peau et l'ajout de pochettes additionnelles sur les côtés de la veste semblent donc avoir amélioré la performance de ce système de thermorégulation. Les mesures complémentaires de température et d'humidité relative à l'intérieur des VIP ont démontré que la présence des MCP favorise le maintien d'une température inférieure à 35 °C à l'intérieur du VIP pendant toute la durée du test, favorisant ainsi l'échange thermique par convection malgré un déplacement d'air minime à l'intérieur de l'habit. Ils permettent également de réduire l'humidité relative d'environ 17 % à l'intérieur des VIP, améliorant ainsi l'efficacité de l'évaporation de la chaleur.

L'autre objectif de cette étude était d'évaluer l'efficacité du **matériau double densité conçu pour fabriquer le VIP (DD)** et de documenter ses effets sur les différents ajustements physiologiques associés au travail en ambiance chaude.

Le matériau double densité semble produire un effet d'isolation qui devient avantageux seulement lorsque les MCP sont présents à l'intérieur du vêtement, mais conserve davantage la chaleur en l'absence des MCP. En effet, la condition DD/MCP a permis de réduire significativement le CCR et donc d'avoir un effet sur la thermorégulation. La combinaison

DD/MCP a aussi rendu possible un abaissement de la température interne par rapport aux autres conditions évaluées. Par contre, la condition DD/T-shirt cause l'augmentation la plus importante du CRR et obtient des valeurs de température cutanée significativement supérieures à celles des trois autres conditions.

Les résultats de cette étude démontrent que la recherche et le développement de nouveaux matériaux permettant de réduire la contrainte thermique pour le métier de pompier sont pertinents puisque les nouveaux matériaux qui en découlent peuvent potentiellement améliorer l'efficacité de la thermorégulation lors du travail en ambiance chaude. Toutefois, il est important de préciser que la portée des résultats obtenus n'est valable que pour des conditions de travail (effort physique, température et humidité relative) comparables ou inférieures à celles utilisées lors des expérimentations.

Pour les chercheurs et les concepteurs, les mesures de température et d'humidité relative à l'intérieur des VIP semblent être un bon indicateur pour évaluer la performance des matériaux utilisés ou des concepts développés afin de réduire les contraintes liées au microclimat qui se forme à l'intérieur de ce type de vêtement.

BIBLIOGRAPHIE

ACSM – American College of Sport Medicine (2000). ACSM's Guidelines for Exercise testing and prescription. 6e édition. Lippincott Williams & Wilkins, USA, 368 p.

ASTM F2300-10. (2010). Standard test method for measuring the performance of personal cooling systems using physiological testing. ASTM International, Philadelphia.

Astrand P.O. & Rodahl K. (1994) Evaluation de l'aptitude physique à partir d'épreuves de laboratoire. La régulation thermique, pp.409-444. Précis de physiologie de l'exercice musculaire. Masson ed., 3e édition.

Baker, S.J., Grice, J., Roby, L. & Matthews, C. (2000). Cardiorespiratory and thermoregulatory response of working in fire-fighter protective clothing in a temperate environment. *Ergonomics*, 43, p. 1350-1358.

Bennett, B. L., Hagan, R. D., Huey, K. A., Minson, C. & Cain, D. (1995). Comparison of two cool vests on heat-strain reduction while wearing a firefighting ensemble. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 70(4), 322-328.

Bommadevara, M. & Zhu, L. (2002). Temperature difference between the body core and arterial blood supplied to the brain during hyperthermia or hypothermia in humans. *Biomechanics and modeling in mechanobiology*, 1(2), 137-149.

Bouchama, A. & Knochel, J. P. (2002). Heat stroke. *New England Journal of Medicine*, 346(25), 1978-1988.

Brinquin L. & Buffat J.J. (1994) Coup de chaleur, aspects épidémiologiques, clinique et thérapeutique. *Semaine des Hôpitaux de Paris*, 70, 17-18, 507-515.

Brouha, L., Maxfield, M. E., Smith, P. E. & Stopps, G. J. (1963). Discrepancy between heart rate and oxygen consumption during work in the warmth. *Journal of applied physiology*, 18(6), 1095-1098.

Canadian Fallen Firefighters Foundation (CFFF). Récupéré le 2 juillet 2014 de : <http://www.cfff.ca/>

Candas V. & Botherel B. (1989) Hydratation, travail et chaleur. *Cahier de note documentaire*, 135, 241-245

Carter, J. M., Rayson, M. P., Wilkinson, D. M., Richmond, V. & Blacker, S. (2007). Strategies to combat heat strain during and after firefighting. *Journal of Thermal Biology*, 32(2), 109-116.

Chaffin D.B., Andersson G.B.J. & Martin B.J. (2006) *Occupational Biomechanics*. Wiley-Interscience.

- Chou, C., Tochihara, Y. & Kim, T. (2008). Physiological and subjective responses to cooling devices on firefighting protective clothing. *European journal of applied physiology*, 104(2), 369-374.
- Cotter, J. D., Sleivert, G. G., Roberts, W. S. & Febbraio, M. A. (2001). Effect of pre-cooling, with and without thigh cooling, on strain and endurance exercise performance in the heat. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 128(4), 667-677.
- Eglin, C. M. (2007). Physiological Responses to Fire-fighting: Thermal and Metabolic Considerations, *Journal of the Human-Environment System*, 10(1), 7-18.
- 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.
- Fahy R.F., LeBlanc P.R. & Molis J.L. (2011) Firefighter fatalities in the United States 2010. National Fire Protection Association (NFPA).
- Ftaiti, F., Duflot, J. C., Nicol, C. & Grélot, L. (2001). Tympanic temperature and heart rate changes in firefighters during treadmill runs performed with different fireproof jackets. *Ergonomics*, 44(5), 502-512.
- Gagge, A. P., Herrington, L. P. & Winslow, C. E. (1937). Thermal interchanges between the human body and its atmospheric environment. *American Journal of Epidemiology*, 26(1), 84-102.
- Gao, C., Kuklane, K. & Holmér, I. (2007). Cooling effect of a PCM vest on a thermal manikin and on humans exposed to heat. *Environmental Ergonomics*, 12, 146-149.
- Gao, C., Kuklane, K. & Holmér, I. (2011a). Cooling vests with phase change materials: the effects of melting temperature on heat strain alleviation in an extremely hot environment. *European journal of applied physiology*, 111(6), 1207-1216.
- Gao, C., Wang, F., Kuklane, K. & Holmér, I. (2011b). Personal cooling with phase change materials in a very hot environment. In *The Fourth International Conference on Human-Environment System, ICHES2011* (pp. 265-267).
- Geraut C. & Dupas D. (1991) Travail à la chaleur. EMC Toxicologie et pathologie professionnelle, 16500 B10, 6p.
- Griefahn, B., Künemund, C. & Bröde, P. (2003). Evaluation of performance and load in simulated rescue tasks for a novel design SCBA: effect of weight, volume and weight distribution. *Applied Ergonomics*, 34(2), 157-165.
- ISO 14505-3:2005. (2005). Ergonomie des ambiances thermiques – Évaluation des ambiances thermiques dans les véhicules – Partie 3 Évaluation du confort thermique en ayant recours à des sujets humains. ISO – Organisation internationale de normalisation, Genève.

- Iwase, S., Cui, J., Wallin, B. G., Kamiya, A. & Mano, T. (2002). Effects of increased ambient temperature on skin sympathetic nerve activity and core temperature in humans. *Neuroscience letters*, 327(1), 37-40.
- Mairiaux P. & Malchaire J. (1990) *Le travail en ambiance chaude*. Masson ed., Paris, 172p.
- Malchaire J. (1996) *Travail à la chaleur*. EMC Toxicologie, pathologie professionnelle, 16-781-A-20, 4p.
- Marieb E. N. (2005) "Anatomie et physiologie humaine." Éditions De Boeck Université. Erpi. 1290p.
- Martinet, C., Meyer J.P. (1999). *Travail à la chaleur et confort thermique*. INRS, NS184 Note scientifique et technique, décembre 1999, 60p.
- McArdle, W., Katch, F. & Katch, V. (2001). *Physiologie de l'activité physique : énergie, nutrition et performance*. Maloine/Edisem. 4e éd. Paris. 711 p
- McEntire, S. J., Suyama, J. & Hostler, D. (2013). Mitigation and Prevention of Exertional Heat Stress in Firefighters: A Review of Cooling Strategies for Structural Firefighting and Hazardous Materials Responders. *Prehospital Emergency Care*, 17(2), 241-260.
- McLellan, T. M., Jacobs, I. & Bain, J. B. (1993). Influence of temperature and metabolic rate on work performance with Canadian Forces NBC clothing. *Aviation, space, and environmental medicine*, 64(7), 587-594.
- NFPA 1971:2007. (2007). *Standard on protective ensembles for structural fire fighting and proximity fire fighting*. National Fire Protection Association.
- Nielsen, B., Kassow, K. & Aschengreen, F. E. (1988). Heat balance during exercise in the sun. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 58(1-2), 189-196.
- Nielsen, B., Strange, S., Christensen, N. J., Warberg, J. & Saltin, B. (1997). Acute and adaptive responses in humans to exercise in a warm, humid environment. *Pflügers Archiv*, 434(1), 49-56.
- Sköldström, B. (1987). Physiological responses of fire fighters to workload and thermal stress. *Ergonomics*, 30(11), 1589-1597.
- Smith D.L., Petruzzello, S.J., Kramer, J.M. et Misner, J.E. (1997). The effects of different thermal environments on the physiological and psychological responses of firefighters to a training drill. *Ergonomics*, 40, p. 500-510.
- Smith, D., Liebig, J., Steward, N., & Fehling, P. (2010). *Sudden Cardiac Events in the Fire Service: Understanding the Cause and Mitigating the Risk*. Skidmore College
- Tattersall, A.J. & Thomas, N.T. (1985). Flames and sweat: A physiological assessment of fire fighting apparel, *Contemporary ergonomics*, Proceedings of the Ergonomics Society's: Annual conference 27-29 march 1985.

von Heimburg E.D., Rasmussen A.K., Medbø J.I. (2006). Physiological responses of firefighters and performance predictors during a simulated rescue of hospital patients. *Ergonomics*. Feb 10;49(2):111-26.

Wang, Y., Zhang, Z., Li, J. & Zhu, G. (2013). Effects of inner and outer clothing combinations on firefighter ensembles' thermal-and moisture-related comfort levels. *Journal of The Textile Institute*, 104(5), 530-540.

Wästerlund, D. S. (1998). A review of heat stress research with application to forestry. *Applied ergonomics*, 29(3), 179-183.

Webster, J., Holland, E. J., Sleivert, G., Laing, R. M. & Niven, B. E. (2005). A light-weight cooling vest enhances performance of athletes in the heat. *Ergonomics*, 48(7), 821-837.

Williams-Bell F.M., Boisseau G., McGill J., Kostiuk A., Hughson R.L. (2010). Air management and physiological responses during simulated firefighting tasks in a high-rise structure. *Appl Ergon.* Mar;41(2):251-9.

ANNEXE A : TEST DE PRÉDICTION DE LA CONSOMMATION D'OXYGÈNE MAXIMALE

Le test de prédiction sous-maximal qui a été utilisé est le test de marche de Balke. L'avantage de ce protocole réside dans le fait que la vitesse du tapis reste constante alors que l'inclinaison augmente selon le palier du test. Ceci entraîne une variation moins importante de l'ajustement des paramètres du tapis roulant et ainsi une meilleure constance intersujet. Le protocole a été effectué en respectant les étapes suivantes :

1. Installer la montre cardiaque sur le sujet.
2. Prendre la fréquence cardiaque de repos de la façon suivante :
 - a. Le sujet s'assoit sur une chaise de laboratoire et après cinq minutes, la fréquence cardiaque de repos est prise.
3. Instrumenter le sujet : installer le masque et le casque permettant de tenir l'embout de l'analyseur CO₂ et O₂.
4. Expliquer les techniques de marche sur tapis roulant au sujet et le laisser se familiariser avec le tapis (pente de 0 %) et le port des appareils.
5. Faire marcher le sujet à une vitesse de marche vive, mais confortable (5,5 km/h à 0 % d'inclinaison) durant cinq minutes. Cette phase constitue l'échauffement et elle précède le test.
6. Par la suite, le sujet effectue les six paliers de son test de prédiction sous-maximal :
 - a. Le 1^{er} palier a une durée de trois minutes, une vitesse de 5,5 km/h et une pente de 2,5 % (4 METs);
 - b. Le 2^e palier a une durée de trois minutes, une vitesse de 5,5 km/h et une pente de 5 % (5 METs);
 - c. Le 3^e palier a une durée de trois minutes, une vitesse de 5,5 km/h et une pente de 7,5 % (6 METs);
 - d. Le 4^e palier a une durée de trois minutes, une vitesse de 5,5 km/h et une pente de 10 % (7 METs);
 - e. Le 5^e palier a une durée de trois minutes, une vitesse de 5,5 km/h et une pente de 12,5 % (8 METs);
 - f. Le 6^e palier a une durée de trois minutes, une vitesse de 5,5 km/h. Lors de ce palier, la pente du tapis roulant est modifiée afin de conserver une activité de marche, tout en atteignant une intensité de 85 % de la fréquence cardiaque maximale prédite du sujet. La valeur de la pente est établie à l'aide d'une régression linéaire du couple FC/pente des quatre données précédentes permettant d'établir la valeur pente visée en fonction de 85 % de la fréquence cardiaque maximale $[(220 - \text{âge}) \times 85 \%]$ (ACSM, 2000).
7. Mesurer la fréquence cardiaque et la consommation d'oxygène durant toute la durée du test sous-maximal.
8. Une fois le test complété, laisser le sujet marcher lentement pendant trois à cinq minutes afin de favoriser le retour veineux et d'abaisser les fréquences cardiaques à un niveau adéquat (<100 bpm).

Pour effectuer le test, les sujets étaient vêtus d'une tenue sportive (short, T-shirt, sous-vêtement et espadrilles de course) et le tapis était muni d'un mécanisme d'arrêt d'urgence et de rampes permettant de prévenir les pertes d'équilibre. Durant le test, le sujet ne devait pas s'appuyer sur ces rampes, sauf dans le cas d'une situation hasardeuse pouvant mener à un accident. De plus, le tapis roulant était muni d'un harnais de sécurité (modèle Pulsar 3p de la compagnie h/p/cosmos) qui permettait de retenir le sujet afin d'éviter qu'il se blesse en cas de chute.

ANNEXE B : ÉVALUATION PSYCHOPHYSIQUE DE L'EFFORT

L'échelle utilisée lors de ces tests était l'échelle de Borg 6-20. Cette échelle est principalement utilisée dans les situations où les astreintes physiques ressenties par les sujets sont associées à l'augmentation de la fréquence cardiorespiratoire. L'échelle 6-20 correspond au fait que, chez les jeunes adultes, la fréquence cardiaque varie généralement de 60 à 200 battements par minute. C'est la plage possible entre l'état de repos et la fréquence cardiaque maximale.

6	Repos, aucun effort
7	Très, très faible
8	
9	Très faible
10	
11	Modéré
12	
13	Un peu difficile
14	
15	Difficile
16	
17	Très difficile
18	
19	Très, très difficile
20	

Figure B.1 Représentation des niveaux d'effort utilisés pour mesurer la perception psychophysique des participants selon l'échelle de Borg 6-20

ANNEXE C : PROCÉDURE DE TEST

VISITE #__

Participant ID : _____ Date : __/__/____

Heure d'arrivée : _____

Date de naissance (Jour/mois/année) : __/__/__

Âge : _____

Taille (cm) : _____

Explications de la visite

Restrictions ;

- ☐ Caféine
- ☐ Drogue
- ☐ Alcool
- ☐ Tabagisme
- ☐ Repas riche avant l'effort physique (2 heures)

Remise du journal alimentaire 24 heures avant l'évaluation

- ☐ Oui
- ☐ Non, justifiez

Reprise du armband

☐ Oui ☐ Non, justifiez : _____

Date du début : __/__/__ Heure du début : ____h ____min

Date de fin: __/__/__ Heure de fin: ____h ____min

Lettre du Armband : _____

Critère d'arrêt :
85 % de la FC prédite : $(220 - \text{âge}) \times 0,85 =$ _____
Température interne : 39 °C
Température externe : 38 °C

**Point de consigne de la
chambre climatique :**
Température : 35 °C
Humidité : 50 %

Bilan alimentaire du dernier repas

•
•
•
•
•

	Date : ____/____/____ Heure : _____
	Contactez le client 24 h avant (rappel : tenue sport, pas de café, drogue ou alcool, pas d'exercice, mettre le brassard armband, pas de gros repas 2 h avant, journal alimentaire, spécifier heure rencontre)

X	Étapes	Mesure
AVANT L'ARRIVÉE DU SUJET		
	Partir la pompe du moxus	
	Préparer le WBGT si disponible et le mettre dans la chambre climatique	
	Ouvrir l'ordinateur et le logiciel du moxus	
	Ouvrir l'ordinateur et le logiciel des systèmes Biopac et Équivital	
	Ouvrir l'interrupteur principal du tapis roulant et le faire fonctionner	
	Calibrer le Moxus	
	Régler et démarrer la chambre climatique à 35°C et 50 % d'humidité	
	Établir la condition du jour et la noter	_____
	Préparer les différents capteurs, masques et harnais afin d'optimiser l'espace de travail	
	Précouper des morceaux de ruban adhésif	
	Peser le VIP (pantalon et veste)	_____ kg
	Peser la veste MCP, <u>SI APPLICABLE</u>	_____ g
	Apporter le défibrillateur, le BIA et le tensiomètre dans la salle test	
ARRIVÉE DU SUJET		
	Activer la Core temperature pill	
	Faire avaler la pilule au sujet avec de l'eau et noter l'heure	_____ hh:mm
	Revérifier si les conditions préalables ont été respectées (sinon, il faut le noter)	
	Décrire la séance, expliquer l'échelle de Borg	
	Télécharger les données du brassard et le recharger	
	Permettre au sujet d'aller aux toilettes et éviter, par la suite, que le sujet boive de l'eau ou urine	
	Prendre le poids du sujet en caleçon boxer	_____ kg
	Prendre le BIA du sujet	_____
	Mettre la jaquette et retirer le sous-vêtement	
	Mettre le chandail, le short, les bas, le caleçon, le harnais polar, le harnais Biopac et la veste MCP, <u>SI APPLICABLE</u> dans un cabaret pour aller effectuer la pesée	
	Peser le caleçon seulement	_____ g

X	Étapes	Mesure
	Peser le chandail, le short, les bas, le caleçon, la bande polar, le harnais Équivital	_____ g
	Rapporter la tenue de sport au sujet et lui demander de la vêtir (sauf le chandail)	
	Asseoir le sujet, lui installer la bande polar et le laisser se reposer pendant cinq minutes	
	Prendre la FC de repos	_____ bpm
	Prendre la saturation d'O₂	_____ %
	Prendre la pression artérielle à trois reprises	___/___/___ Sys___/___/___ Dia
	Poser les capteurs de température externe et expliquer en même temps l'échelle de Borg et comment arrêter le tapis en cas d'urgence	
	Préparer les données à caractère personnel pour le Moxus et le mettre en veille sur initier l'étude (start study)	
	Demander au sujet d'endosser son chandail	
	Vérifier la température et l'humidité sur le WBGT et les noter	_____ °C _____ %
	Demander au sujet de vêtir la veste MCP, <u>SI APPLICABLE</u>	
	Poser le brassard équivital par-dessus le chandail et la veste MCP, <u>SI APPLICABLE</u>	
	Placer le masque et le casque VO ₂	
	Enfiler l'habit de pompier au sujet, le harnais du tapis roulant et finalement le harnais de la bonbonne	
	Prendre le poids du sujet avec tous les équipements	_____ kg
	Prendre la FC du sujet debout	_____ bpm
	Déterminer la pente et la vitesse du tapis à l'aide de l'équation EWR incluant le poids du sujet avec tout l'équipement et une vitesse de 5,5 km/h si possible (doit être environ de 250 Watts)	_____ km/h _____ % _____ W
	Récapituler les consignes et demander s'il y a des questions	
	Faire entrer le sujet dans la chambre, connecter les tubes au masques et attacher et vérifier le harnais du tapis roulant	
	Appuyer sur initier l'étude (start study) sur le logiciel du moxus afin de commencer l'enregistrement et noter l'heure affichée sur l'horloge de l'ordinateur (idéalement en incluant les secondes)	__ h __ m __ s

X	Étapes	Mesure
	Démarrer le tapis roulant à la vitesse et à la pente requise	
	Prendre les mesures de l'échelle de Borg aux cinq minutes pour les 20 premières minutes, toutes les 2 minutes 30 pour les 10 minutes suivantes et toutes les minutes après 30 minutes (monitorage en même temps des températures cutanée et interne et de la FC pour valider les critères d'arrêt)	Noter sur les feuilles subséquentes
FIN DU TEST		
	Noter la durée totale du test	_____ m _____ s
	Arrêter la chambre climatique et ouvrir la porte	
	Déconnecter les tubes VO ₂ et détacher le harnais du tapis	
	Peser le sujet avec tous les équipements	_____ kg
	Enlever les équipements du sujet (incluant les capteurs de température) et ne garder que les caleçons	
	Peser le sujet en caleçon	_____ kg
	Prendre le BIA	_____
	Mettre la jaquette, retirer le caleçon, hydrater et asseoir le sujet	
	Prendre la FC (10 minutes après l'arrêt du test)	_____ bpm
	Prendre la saturation d'oxygène (10 minutes après l'arrêt du test)	_____ %
	Prendre la pression artérielle à trois reprises (10 minutes après l'arrêt du test)	____/____/____ Sys ____/____/____ Dia
	Terminer l'étude sur le moxus et noter l'heure	____ h ____ m
	Arrêter l'enregistrement sur le Biopac	
	Déconnecter et fermer le capteur SEM Équivital	
	Mettre le chandail, le short, les bas, le caleçon, le harnais polar, le harnais Biopac et la veste MCP, <u>SI APPLICABLE</u> dans un cabaret pour aller effectuer la pesée	
	Peser le caleçon seulement	_____ g
	Peser la veste MCP, <u>SI APPLICABLE</u>	_____ g
	Peser le chandail, le short, les bas, le caleçon, la bande polar, le harnais Équivital	_____ g
	Peser le VIP (pantalon et veste)	_____ kg
	Faire remplir les questionnaires nécessaires au sujet	
	Redonner le brassard	
	Fixer un nouveau rendez-vous	

X	Étapes	Mesure
	Monitoring du patient pendant 15 minutes en ambiance contrôlée	
	Retourner le défibrillateur au gym	
	Laver les différents instruments de mesure	
	Recharger les MCP, <u>SI APPLICABLE</u>	
	Collecter, sauvegarder et archiver les données	
	Noter les événements particuliers	