

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

ÉVALUATION DE LA RÉPONSE PHYSIOLOGIQUE AU PORT DE
VÊTEMENTS INDIVIDUELS DE PROTECTION : APPLICATION À UNE
NOUVELLE TECHNOLOGIE DE MATÉRIAU À CHANGEMENT DE PHASE
POUR LES HABITS DE POMPIERS

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN KINANTHROPOLOGIE

PAR
ALEXIS BRIEN-BRETON

FÉVRIER 2014

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

En premier lieu, je tiens à remercier pour cet ouvrage mon directeur de recherche, le D^r Denis Marchand, pour la passion qu'il a su me transmettre au fil des (très nombreuses) années où j'ai été sous sa direction. Merci de m'avoir impliqué dans d'innombrables projets académiques et sur le terrain, qui ont permis de forger mon expérience professionnelle en tant qu'ergonome et kinésiologue.

Merci à Carole Roy pour son dévouement, sa patience et sa grande connaissance technique des différents instruments de mesure et équipements.

Merci à mes ex-collègues de bureau Vincent Mandeville-Gauthier et Christian Kelly, de m'avoir guidé au début de mon cheminement.

Je désire souligner la grande aide m'ayant été apportée par Jean-Philippe Leduc-Gaudet et Haeila Vroye lors de la collecte des données.

À tous les sujets ayant pris part à cette étude, je vous remercie; sans vous ça n'aurait pas été possible.

Finalement, merci à l'IRSST et au groupe CTT en particulier à madame Chantal Gauvin et monsieur Dominic Tessier d'avoir concrétisé le projet.

TABLES DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES.....	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	x
LISTE DES ÉQUATIONS	xii
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	xiii
RÉSUMÉ	xiv
CHAPITRE I	
INTRODUCTION	1
CHAPITRE II	
PROBLÉMATIQUE.....	3
CHAPITRE III	
REVUE DE LITTÉRATURE.....	5
3.1 Thermorégulation.....	5
3.2 Échanges thermiques.....	6
3.2.1 Conduction	7
3.2.2 Convection.....	8
3.2.3 Rayonnement.....	8
3.2.4 Évaporation	9
3.3 Le bilan thermique et mécanismes de contrôle.....	10
3.3.1 Ajustements circulatoires	11
3.3.2 La sudation	12
3.4 Paramètres d'influence des échanges thermiques.....	12
3.4.1 Température de l'air	12
3.4.2 Humidité de l'air	13
3.4.3 Vitesse de l'air.....	13
3.4.4 Température moyenne de rayonnement	13

3.4.5	Habillement	14
3.4.6	Métabolisme de travail	15
3.5	Paramètres physiologiques et dépense énergétique	16
3.5.1	Consommation d'oxygène (VO_2)	16
3.5.2	Fréquence cardiaque	17
3.5.3	Observations, tables et normes	19
3.6	Travail en ambiance chaude et complications	20
3.6.1	Perte d'eau et déshydratation	20
3.6.2	Crampes de chaleur	22
3.6.3	La syncope	23
3.6.4	Le coup de chaleur	23
3.6.5	Acclimatation	24
3.7	Facteurs de variabilité individuels	26
3.7.1	Âge	26
3.7.2	Sexe	27
3.7.3	Poids	28
3.7.4	Alimentation, alcool et médicaments	28
3.8	Vêtements individuels de protection	29
3.8.1	Matériau à changement de phase (MCP)	30
CHAPITRE IV		
MÉTHODOLOGIE		31
4.1	Sujets	31
4.2	Test de prédiction de la consommation d'oxygène maximale	33
4.3	Conditions	35
4.4	Variables dépendantes	40
4.4.1	Consommation d'oxygène (VO_2)	40
4.4.2	Fréquences cardiaques	40
4.4.3	Température cutanée	41
4.4.4	Température interne	41

4.4.5 Pression artérielle et saturation de l'hémoglobine	42
4.4.6 Taux d'hydratation	42
4.4.7 Perte hydrique.....	43
4.4.8 Mesures psychophysiques	43
4.5 Variables extrinsèques et environnementales	45
4.5.1 Sujets	45
4.5.2 Chambre climatique	46
4.6 Procédure.....	46
4.7 Limites	50
4.8 Analyses statistiques	50
CHAPITRE V	
RÉSULTATS	52
5.1 Analyse selon la méthode d'essai normalisée ASTM F2300-10	53
5.1.1 Température ambiante et humidité relative.....	53
5.1.2 Durée d'exposition	54
5.1.3 Charge de travail externe.....	55
5.1.4 Consommation d'oxygène (VO ₂).....	56
5.1.5 Fréquence cardiaque.....	59
5.1.6 Température cutanée	61
5.1.7 Température interne	63
5.1.8 Perte hydrique.....	65
5.1.9 Perception psychophysique	66
5.2 Analyse statistique sur base de temps uniforme	68
5.2.1 Consommation d'oxygène (VO ₂).....	68
5.2.2 Fréquence cardiaque.....	70
5.2.3 Température cutanée	72
5.2.4 Température interne	75
CHAPITRE VI	
DISCUSSION	79

6.1 Le matériau à changement de phase.....	79
CHAPITRE VII	
CONCLUSION	85
ANNEXE A	
FOMULAIRE DE PRÉSÉLECTION	87
ANNEXE B	
FORMULAIRE DE CONSENTEMENT	94
ANNEXE C	
QAAP.....	99
ANNEXE D	
PROCÉDURE DE TEST	100
ANNEXE E	
DÉPENSE ÉNERGÉTIQUE 24H PRÉ-TEST	107
BIBLIOGRAPHIE.....	109

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
3.1 Interactions entre les mécanismes de thermorégulation	7
3.2 Mécanismes de régulation thermique lors d'une situation d'hyperthermie.....	11
3.3 Effet de l'habillement sur la température rectale et cutanée lors de l'exercice et de la récupération.....	15
3.4 Évolution de la FC et de la VO_2 selon une ambiance thermique neutre et chaude	17
3.5 Distribution du sang entre les divers territoires selon l'intensité du travail	18
3.6 Évolution de la FC dans le temps lors d'un travail en ambiance chaude et illustration de la composante motrice (dFC_m) et thermique (dFC_t).....	19
3.7 Progression des troubles liés à la chaleur et des signes annonciateurs.....	22
3.8 Variations de la température rectale (bleu foncé), de la FC (bleu pâle) et du débit sudoral (rouge) au cours de l'acclimatation.....	25
3.9 Effet de l'acclimatation à la chaleur sur la FC durant l'exercice	26
4.1 Pochette de MCP (A) et pochette de sable (B) utilisée dans cette étude	36
4.2 Veste prototype, permettant de contenir les sachets de MCP.....	37
4.3 Intérieur de la veste prototype où l'on peut apercevoir les pochettes cousues, permettant de contenir les sachets de MCP	37
4.4 Représentation des niveaux d'effort utilisés pour mesurer la perception psychophysique des participants selon l'échelle de Borg 6-20.	44
5.1 Températures ambiante moyennées selon les différentes conditions évaluées.....	54
5.2 Pourcentages d'humidité relative moyennés selon les différentes conditions évaluées.....	54
5.3 Durées d'exposition moyennées des sujets, selon les différentes conditions évaluées.....	55

5.4	Charges de travail externe (CTE) moyennées des sujets, selon les différentes conditions évaluées.....	56
5.5	Représentation brute de la consommation d'oxygène pour les sept sujets pour la condition Standard.....	57
5.6	Moyennes de la consommation d'oxygène (ml/kg/min) par minute de 6 sujets, selon les différentes conditions évaluées.....	59
5.7	Représentation brute de la fréquence cardiaque pour les sept sujets pour la condition Standard.....	60
5.8	Moyennes de la variation du coût cardiaque relatif par minute des sujets, selon les différentes conditions évaluées.....	61
5.9	Représentation brute de la température cutanée pour les sept sujets pour la condition Standard.....	62
5.10	Moyennes de la variation de la température cutanée par minute des sujets, selon les différentes conditions évaluées (*p<0.05).....	63
5.11	Représentation brute de la température interne pour les sept sujets pour la condition Standard.....	64
5.12	Moyennes de la variation de la température interne par minute des sujets, selon les différentes conditions évaluées.....	65
5.13	Moyennes de la variation de la perte hydrique par minute des sujets, selon les différentes conditions évaluées.....	66
5.14	Moyennes de la variation de la perception de l'effort par minute des sujets, selon les différentes conditions évaluées.....	67
5.15	Représentation brute de la consommation d'oxygène moyennée de 6 sujets pour les trois conditions évaluées.....	69
5.16	Moyennes de la variation de la consommation d'oxygène selon la condition évaluée et le temps.....	70
5.17	Représentation brute de la fréquence cardiaque moyennée des sujets pour les trois conditions évaluées.....	71
5.18	Moyennes de la variation du coût cardiaque relatif selon la condition évaluée et le temps.....	72
5.19	Représentation de la variation de la température cutanée moyennée des sujets pour les trois conditions évaluées.....	73
5.20	Moyennes de la variation de la température cutanée selon la condition évaluée et le temps.....	74

5.21	Représentation de la variation de la température interne moyennée des sujets pour les trois conditions évaluées.....	75
5.22	Moyennes de la variation de la température interne selon la condition évaluée et le temps.....	76
5.23	Moyennes de la variation de la température interne selon la condition évaluée et l'intervalle de temps	77

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
3.1 Classification du métabolisme énergétique en fonction du type d'activité	20
3.2 Composition et poids de 5 VIP utilisés pour l'étude de Marchand et coll. (2006).....	29
4.1 Caractéristiques des sujets de l'étude	32
5.1 Durées d'exposition et critères d'arrêts (T_{int} : température interne, FC : fréquence cardiaque, Volontaire (S) sujet ou (E) expérimentateur) pour chacun des sujets selon la condition	52
5.2 Charge de travail externe (Charge) en fonction de la vitesse (Vitesse) et de l'inclinaison (Pente) du tapis roulant pour chacun des sujets selon la condition	53
5.3 Résultats des analyses statistiques de comparaison par paires pour les valeurs de variation de la température cutanée selon les différentes conditions évaluées (* $p < 0.05$).....	63
5.4 Résultats des analyses statistiques de comparaison par paires pour les valeurs de variation de la perception de l'effort selon les différentes conditions évaluées (* $p < 0.05$).....	67
5.5 Résultats des analyses statistiques de comparaison par paires pour les valeurs de coût cardiaque relatif selon le facteur temps (* $p < 0.05$)	72
5.6 Résultats des analyses statistiques de comparaison par paires pour les valeurs de température cutanée selon le facteur condition (* $p < 0.05$)	74
5.7 Résultats des analyses statistiques de comparaison par paires pour les valeurs de température cutanée selon le facteur temps (* $p < 0.05$).....	74
5.8 Résultats des analyses statistiques de comparaison par paires pour les valeurs de température interne selon le facteur temps (* $p < 0.05$).....	76
5.9 Résultats des analyses statistiques de comparaison par paires pour les valeurs d'augmentation de température interne selon le facteur interval_temps pour la condition standard (* $p < 0.05$)	77

- 5.10** Résultats des analyses statistiques de comparaison par paires pour les valeurs d'augmentation de température interne selon le facteur interval_temps pour la condition MCP (* $p < 0.05$) 78
- 5.11** Résultats des analyses statistiques de comparaison par paires pour les valeurs d'augmentation de température interne selon le facteur interval_temps pour la condition contrôle (* $p < 0.05$) 78

LISTE DES ÉQUATIONS

Équation	Page
3.1 Bilan thermique	10
3.2 Perte de chaleur par convection.....	10
3.3 Perte de chaleur par évaporation.....	10
4.1 Charge de Travail Externe	39
4.2 Température globale de la peau.....	41
5.1 Variation dans le temps	58
5.2 Coût Cardiaque Relatif	60

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ACSM	American College of Sports Medicine
ARA	Appareil respiratoire autonome
ASTM	American Society for Testing and Materials
Bpm	Battements par minute
CCR	Coût cardiaque relatif
CTT	Centre de technologie textile
FC	Fréquence cardiaque
HR	Humidité relative
INRS	Institut national de recherche et de sécurité
IRSST	Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité au travail
ISO	International organization for standardization
MCP	Matériau à changement de phase
MET	Metabolic Equivalent of Task
NFPA	National Fire Protection Association
NIOSH	National Institute Of Safety and Health
QAAP	Questionnaire sur l'aptitude à l'activité physique
CTE	Charge de travail externe
SPSS	Statistical Product and Service Solutions
UQAM	Université du Québec à Montréal
VDT	Variation dans le temps (Δ /min)
VES	Volume d'éjection systolique
VIP	Vêtements individuels de protection
VO ₂	Consommation d'oxygène

RÉSUMÉ

Cette étude visait à évaluer la réponse physiologique associée au port de vêtement individuel de protection (VIP) chez les pompiers, munis d'une nouvelle technologie de matériau à changement de phase (MCP). Les matériaux à changement de phase, représentent un système permettant l'absorption de chaleur lors de leur transition de solide à liquide. Un nouveau matériau à changement de phase à base de sels hydratés ignifuges n'avait pas encore été validé sur des humains en situation de contrainte thermique importante. Trois conditions expérimentales ont été définies pour cette étude : Standard, MCP et Contrôle. Ces conditions ont permis de démontrer une différence significative pour les mesures les plus importantes associées à la thermorégulation telles que : la température cutanée, la fréquence cardiaque et la température interne. Les tests se déroulaient sur tapis roulant, à l'intérieur d'une chambre climatique réglée à 35°C et 50% d'humidité relative. Une charge externe standardisée de 250W était imposée aux sujets en ajustant le pourcentage d'inclinaison du tapis selon une vitesse constante de 5.5km/h. Les sujets avaient pour instruction de poursuivre le test jusqu'à abandon ou jusqu'à l'atteinte d'un des critères d'arrêt définis dans la méthode d'essai normalisée ASTM F2300-10. Des analyses à mesure répétées (ANOVA) ont permis d'observer que la condition MCP a eu un effet significatif sur la température cutanée et une tendance dans le temps notable sur la température interne. Malgré certaines limites ayant été recensées dans cette étude, dont un échantillon de huit sujets, les conclusions obtenues ouvrent la voie à une optimisation de la disposition et de l'efficacité des MCP dans le VIP.

MOTS-CLÉS : matériau à changement de phase, vêtement individuel de protection, thermorégulation, consommation d'oxygène

CHAPITRE I

INTRODUCTION

Plusieurs métiers, de par leur nature, entraînent des contraintes thermiques importantes nécessitant le recours à des vêtements individuels de protection (VIP). Les travailleurs œuvrant dans le domaine de la santé tel que les pompiers et ambulanciers, aussi bien que ceux dans le domaine de transformation des métaux, requièrent le port de VIP à un certain moment de leur travail. Toutefois, ces vêtements individuels de protection nuisent au processus d'échange thermique qui se produit normalement entre le corps et son environnement en créant un microclimat à l'intérieur de l'habit. Ce microclimat se sature rapidement de vapeur d'eau et empêche fortement les pertes de chaleur par évaporation. De plus, les matériaux utilisés dans la fabrication des VIP ont souvent le désavantage d'être lourds et de manquer de souplesse.

Dans le cas des pompiers, les contraintes thermiques qu'entraîne le port de ces VIP sont jumelées aux contraintes thermiques environnementales ainsi qu'à des exigences physiques importantes. Effectivement, il est démontré que le travail de pompier est exigeant pour le système cardio-respiratoire puisqu'il requiert des efforts physiques importants effectués avec un équipement relativement lourd (ex : l'appareil respiratoire autonome). Ceci entraîne une augmentation de la demande physiologique et expose les travailleurs à de hauts risques d'accident cardiovasculaire. D'ailleurs, selon les statistiques du National Institute Of Safety and Health (NIOSH), plus de 40% des causes de décès chez les pompiers en 2011 était attribuable à des accidents

cardiovasculaires menant à une défaillance cardiaque, d'où l'importance d'accorder un intérêt particulier aux moyens de réduire les contraintes thermiques produites par le port du VIP.

La recherche et le développement dans ce secteur ont permis d'ouvrir la voie à des matériaux potentiellement capables de diminuer les facteurs de risque associés au travail en ambiance thermique chaude. Des habits constitués de nouveaux matériaux plus légers et malléables, ainsi que de systèmes d'absorption de la chaleur tel que les matériaux à changement de phase (MCP) permettraient de diminuer les causes de décès attribuables aux accidents cardio-vasculaires.

Dans cette optique, l'objectif de cette étude vise à évaluer l'efficacité d'un système d'absorption de la chaleur composé de matériau à changement de phase (MCP) intégré au vêtements individuels de protection que portent les pompiers.

CHAPITRE II

PROBLÉMATIQUE

Bien que l'homme soit une machine d'adaptation fascinante, il reste extrêmement sensible aux changements de température dictés par son environnement. À preuve, le corps humain nu peut survivre dans une plage très étroite de température ambiante, soit entre 28 et 30°C (Gagge et coll., 1938). En dehors de cette plage, le recours à la technologie (e.g. air conditionné, vêtements, systèmes de chauffage) ainsi que des adaptations physiologiques doivent se produire afin de s'assurer que l'équilibre thermique est maintenu. Le corps humain tente de maintenir sa température centrale constante autour de $37^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, au-delà de cette limite, des problèmes physiologiques et une baisse de performance peuvent se produire. Selon Bommadevara et Liang (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 à travers 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, ce mécanisme est dépendant de plusieurs facteurs notamment l'humidité relative, la vitesse de l'air, le type d'habillement et la mouillure cutanée. 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 le microclimat, une absence de perte de

chaleur par convection ainsi qu'une mouillure cutanée importante entraîne une accumulation de chaleur rapide et importante par l'individu portant cet équipement. De plus, le poids de cet équipement a pour effet d'augmenter la contrainte physique imposée sur le 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 de plusieurs normes établies relativement au travail en ambiance thermique chaude (Predicted Heat Strain, Wet Bulb Globe Temperature, American Conference of Industrial Hygiene).

Présentement, la composition des vêtements individuels de protection des pompiers est la même soit, un revêtement extérieur résistant au feu (Nomex, Kevlar, etc.), l'écran humidifuge (membrane coupe-vapeur) et la doublure thermique. Une étude visant à développer une nouvelle technologie permettant de réduire les contraintes liées à l'accumulation de chaleur par le porteur a été réalisée au Collège de St-Hyacinthe, par l'entremise du Groupe CTT et de ses partenaires industriels. Cette technologie vise à améliorer le confort thermophysique des VIP en misant sur un système de thermorégulation de la température corporelle à l'aide d'un nouveau matériau à changement de phase (MCP) à base de sels hydratés ignifuges, installé à l'intérieur du VIP standard. Le MCP représente un média de stockage de chaleur absorbant l'excès de chaleur généré par le corps via la transition de phase solide-liquide du matériau avec une température de transition variant entre 25°C et 32°C.

Toutefois, puisque ce MCP novateur n'a pas encore fait l'objet d'étude sur des humains en situation de contrainte thermique importante, il était indispensable de réaliser des essais avec sujets pour mesurer l'efficacité et l'impact de celui-ci sur les différentes variables physiologiques dans des conditions contrôlées. Ces essais permettront de valider l'impact de ce nouveau matériau sur l'astreinte thermique ressentie par le travailleur lors d'un travail en ambiance thermique chaude.

CHAPITRE III

REVUE DE LITTÉRATURE

3.1 Thermorégulation

Chez l'être humain, la température du corps et plus précisément, la température interne (core) est équilibrée par l'entremise de plusieurs facteurs qui permettent l'accumulation ou la dispersion de chaleur. L'hypothalamus est responsable de la coordination et de l'interaction entre ces différents mécanismes. Un peu à la manière d'un thermostat qui serait réglé à $37^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, celui-ci comble les écarts de cette valeur en engageant les ajustements thermorégulateurs. Ces ajustements peuvent être activés de deux manières soit :

- À travers les récepteurs thermiques contenus dans l'épiderme qui fournissent de l'information au système nerveux central
- Par stimulation directe de l'hypothalamus via les fluctuations de température sanguine qui irrigue cette région

Les récepteurs thermiques de la périphérie agissent comme un avertissement des fluctuations rapides de température de l'environnement en fournissant l'information à l'hypothalamus. Ce dernier peut ainsi déclencher les réactions appropriées afin que ces fluctuations n'influencent pas la température centrale qui, contrairement à la température de la peau, est très sensible aux fluctuations. En comparaison, la température de la peau est maintenue autour de 33°C à 35°C ce qui entraîne une différence entre température centrale et périphérique d'environ 2°C à 4°C (Hardy et Soderstrom, 1938). Toutefois, dans des conditions extrêmes, cette différence peut atteindre jusqu'à 20°C . Cette disparité est due au fait que les membres périphériques

vont permettre une régulation de la température à travers des ajustements circulatoires engendrés par l'hypothalamus. Par exemple, une vasoconstriction déclenchée par une température ambiante très froide peut décupler l'effet isolant de la peau de 6 fois. À l'inverse, la vasodilatation qu'entraînerait une température ambiante très chaude pourrait permettre une perte de chaleur par évaporation de l'ordre de 30ml/min (Sawka et coll., 1992).

3.2 Échanges thermiques

La chaleur se déplace en gradient de température, du chaud vers le froid. Ainsi, bien qu'une serviette humide posée sur le front donne l'impression que c'est la fraîcheur du linge qui permet de refroidir le front, c'est plutôt la chaleur du front qui est transmise au linge via ce gradient de température. D'ailleurs, plus la différence de température entre les deux objets est élevée, plus le transfert de chaleur se fait rapidement.

À l'inverse, le transfert de chaleur cesse lorsque les deux objets ont atteint à peu près la même température. Ce transfert peut s'effectuer à travers quatre mécanismes régulant les échanges thermiques soit, la conduction, la convection, le rayonnement et l'évaporation. La figure 3.1 de la page suivante, illustre l'interaction entre ces différents mécanismes

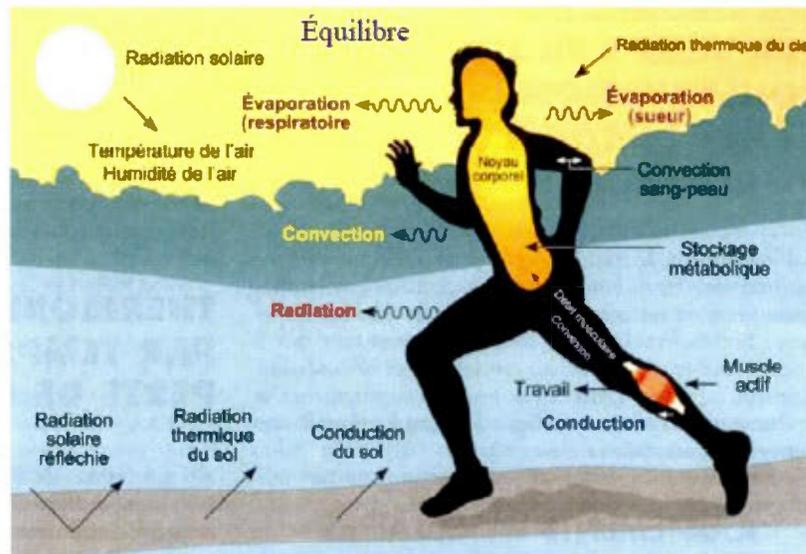


Figure 3.1 Interactions entre les mécanismes de thermorégulation (McArdle, 2001)

3.2.1 Conduction

La conduction représente l'échange de chaleur par contact entre un solide, un liquide ou un gaz et le contact d'une molécule à l'autre se doit d'être direct. Ce mécanisme aura, la plupart du temps, un effet négligeable sur l'équilibre thermique puisque les surfaces en contact avec le corps n'auront généralement peu ou pas de différences de température ou de surfaces de contacts assez importantes pour modifier la température corporelle (Martinet, 1999). Toutefois, l'effet désagréable que peut amener un échange de chaleur par conduction peut se faire ressentir lors d'une promenade hivernale muni de bottes qui prennent l'eau. L'absorption de l'eau par le matériel de la botte entraînera un contact direct entre les pieds et la source de froid et provoquera un très grand inconfort.

3.2.2 Convection

La convection représente l'échange de chaleur par mouvement d'un fluide autour d'un objet ou entre deux fluides. L'efficacité du transfert de chaleur par convection dépend de la vitesse de l'air (Mitchell et coll., 1969). Une vitesse de l'air faible ou absente permettra un réchauffement de l'air en contact avec le corps et cette couche servira alors d'isolation pour la peau, minimisant les pertes de chaleur. Toutefois, si cette couche isolante maintenue autour du corps est constamment renouvelée par de l'air froid dû à une vitesse de l'air importante, la perte de chaleur augmente à mesure que la chaleur est déportée loin du corps. Une perte de chaleur par convection se produit lorsque la température de l'air est inférieure à 35°C ce qui représente environ la température moyenne de la peau. Au-delà de cette valeur, le gradient thermique ne permet pas à la peau de se refroidir.

3.2.3 Rayonnement

Le rayonnement représente le transfert de chaleur par ondes électromagnétiques infrarouges, et ce, indépendamment de la température de l'air, l'humidité et la vitesse de l'air. Puisque le corps humain est généralement plus chaud que les objets environnants, le transfert de chaleur par rayonnement s'effectue du corps vers les objets qui l'entourent à travers l'air ambiant. La chaleur du soleil constitue d'ailleurs un bon exemple de transfert de chaleur par rayonnement, puisque même par une température très froide, le soleil peut être suffisant pour maintenir l'équilibre thermique (Nielsen et coll., 1988). Toutefois, dans le cas où la température des objets environnants excède 35°C (la température moyenne de la peau), l'échange de chaleur se fait des objets environnants vers le corps. Ceci ne laisse alors qu'une seule manière au corps de se refroidir; l'évaporation.

3.2.4 Évaporation

Le principal mécanisme de refroidissement du corps humain provient de l'évaporation de la sueur sur la peau (Gagge et coll., 1937). Ce mécanisme permet au corps de libérer une quantité d'énergie (chaleur) de la peau, vers l'environnement de l'ordre 0.58 kcal par gramme d'eau (Vogt et Metz., 1981). Chez l'humain, l'eau s'évapore au niveau de l'appareil respiratoire et de la peau. 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 la température ainsi que la température cutanée moyenne (Martinet, 1999). En ambiance chaude, la perte de chaleur par évaporation respiratoire est négligeable. Le taux d'humidité est, de loin, le prédicateur le plus important de l'efficacité de la perte de chaleur par évaporation (Nielsen et coll., 1997). Le taux d'humidité représente le ratio entre l'eau contenu dans l'air ambiant à une température donnée versus la quantité totale qui pourrait y être contenu. Lors de l'évaporation par 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 publié en 1997 mentionne effectivement que ce n'est pas la sueur; mais bien l'évaporation de la sueur qui refroidit la peau.

3.3 Le bilan thermique et mécanismes de contrôle

Le bilan thermique dresse la somme des échanges entre le corps humain et l'environnement. Il permet ainsi de déterminer le changement dans la température corporelle (accumulation ou perte de chaleur). Puisque l'humain est homéotherme et cherche à maintenir sa température corporelle constante, la somme du bilan thermique devrait être zéro. L'équation du bilan thermique est présentée ci-dessous.

Équation 3.1 : Bilan thermique

$$\Delta S = (M - W) \pm K \pm C \pm R - E - C_{res} - E_{res}$$

Où M représente le métabolisme, W représente le travail mécanique produit, K représente les échanges par conduction, C représente les échanges par convection, R représente les échanges par rayonnement, E les échanges par évaporation et C_{res} et E_{res} représentent les pertes de chaleur par la respiration. Dans le cadre de cette étude, les valeurs de rayonnement et de convection devront être maintenues nulles, les échanges par conduction sont généralement négligeables et les valeurs de C_{res} et E_{res} peuvent être définies par les équations suivantes.

Équation 3.2 : Perte de chaleur par convection

$$C_{res} = 0.0014 M(34 - t_a)$$

Équation 3.3 : Perte de chaleur par évaporation

$$E_{res} = 0.0173M(P_a - 5.87)$$

Où M représente le métabolisme, t_a représente la température ambiante de l'air inspiré et P_a représente la pression partielle de vapeur d'eau de l'air inspiré.

Selon Benzinger et Theodor (1969), Il existe 3 mécanismes de contrôle du bilan thermique : les ajustements circulatoires, la sudation et l'activation musculaire. En ambiance chaude toutefois, l'activation musculaire devient plutôt une contrainte à la dissipation de chaleur puisqu'une partie de l'énergie utilisée pour l'activation musculaire est transformée en chaleur. La figure 3.2 ci-dessous illustre les mécanismes de contrôle en lien avec une situation d'hyperthermie

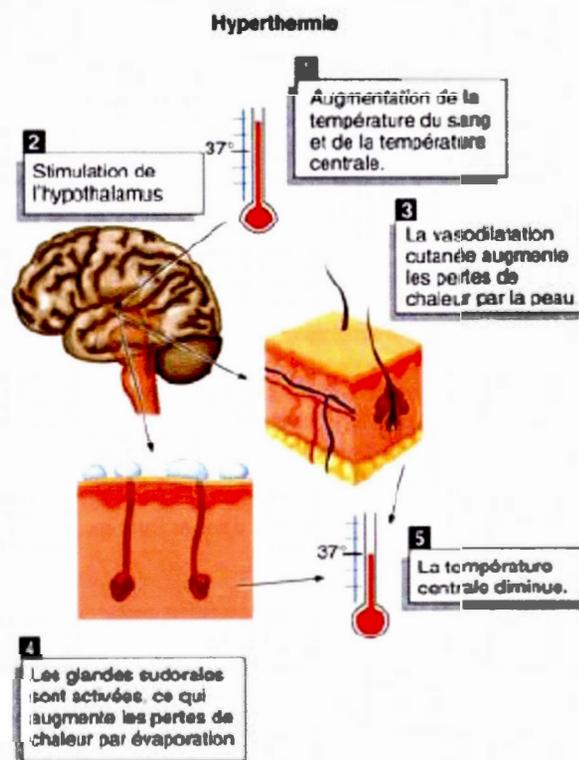


Figure 3.2 Mécanismes de régulation thermique lors d'une situation d'hyperthermie (Wilmore, 2002)

3.3.1 Ajustements circulatoires

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 adrénérergiques responsables de la vasoconstriction. Ceci entraîne une

vasodilatation périphérique et un débit sanguin vers la peau beaucoup plus important (Martinet, 1999). Chez une personne au repos, le débit sanguin cutané est de l'ordre de 0.4 à 0.5 l/min. À la chaleur, celui-ci peut atteindre 2 à 3 l/min chez une personne au travail et jusqu'à 6 l/min chez une personne au repos (Mairiaux et Malchaire, 1990). Cette différence s'explique par le fait que durant l'exécution d'un travail lourd, une partie du débit sanguin doit contribuer à l'alimentation des muscles squelettiques actifs alors qu'au repos, la majeure partie peut contribuer à la dissipation de la chaleur par la peau.

3.3.2 La sudation

La sudation s'effectue par l'entremise de 2 à 4 millions de glandes sudoripares réparties inégalement sur la peau (Nielsen et Nielsen, 1965). Le déclenchement de ce mécanisme est régulé par les centres neurovégétatifs. L'augmentation de la température cutanée stimule les cellules sécrétrices des glandes sudoripares à travers une libération d'acétylcholine. En s'évaporant sur la peau, la sueur permet une dissipation d'énergie, donc de chaleur, de 0.58 kcal. La peau ainsi refroidie permet de refroidir le sang qui regagne la vascularisation centrale et emmagasine à nouveau une quantité de chaleur qui sera reconduite vers la périphérie.

3.4 Paramètres d'influence des échanges thermiques

3.4.1 Température de l'air

La température de l'air (t_a) intervient dans les échanges de chaleur par convection et se mesure en °C, ce qui représente la température sèche ambiante, isolée de toutes sources de rayonnement thermique. Celle-ci peut être mesurée à l'aide d'un thermomètre ordinaire.

3.4.2 Humidité de l'air

L'humidité de l'air influence les échanges de chaleur par évaporation et représente le ratio entre l'eau contenu dans l'air ambiant à une température donnée versus la quantité totale qui pourrait y être contenu. Il est important de se rappeler que, plus l'humidité relative est importante, plus la capacité de l'air ambiant à absorber de l'eau est diminuée. Le taux d'humidité peut se mesurer de 5 façons, en termes d'humidité relative (%), de température humide (t_h en °C), de température humide naturelle (t_{hn} en °C), de pression partielle de vapeur d'eau (P_{aH_2O} en kPa) et de température de rosé (t_r en °C).

3.4.3 Vitesse de l'air

La vitesse de l'air (V_a) influence les échanges de chaleur par convection et par évaporation et représente le déplacement d'air par unité de temps. Cette mesure est calculée en termes de vitesse de déplacement (m/s) et se mesure à l'aide d'un anémomètre à ailettes ou d'un anémomètre thermique (lorsque des valeurs de V_a inférieure à 0.3m/s doivent être mesurées).

3.4.4 Température moyenne de rayonnement

La température moyenne de rayonnement (t_r) influence les échanges de chaleur par rayonnement et représente la température d'une sphère noire et mate de grand diamètre et de température uniforme qui entourerait le sujet et échangerait avec lui la même quantité de chaleur que l'environnement réel. Elle se définit en termes de °C et se mesure à l'aide d'un thermomètre à globe noir.

3.4.5 Habillement

L'habillement n'a pas d'impact sur les principes physiques des échanges de chaleur. Toutefois, il influence ces échanges en modifiant les coefficients de convection, rayonnement et évaporation selon plusieurs études, dont celle menée par Aoyagi, McLellan et Shephard (1994). La figure 3.3 de la page suivante illustre la variation de température rectale et cutanée lors d'un exercice prolongé selon différentes conditions d'habillement. La surface de peau couverte par les vêtements va créer un microclimat qui, selon la perméabilité des tissus, peut devenir indépendant de l'environnement extérieur (Duncan et coll., 1979; Smolander et coll., 1985). Dans le cas des vêtements individuels de protection des pompiers, les conditions environnementales des tests jumelées à un travail physique créent un microclimat complètement saturé en vapeur d'eau à l'intérieur du vêtement (Wang et coll., 2012, McEntire et coll., 2013). Celui-ci nuirait grandement et pourrait même aller jusqu'à empêcher les échanges thermiques par évaporation qui permettraient un refroidissement de la température corporelle. De la même manière, au niveau du rayonnement, un vêtement noir absorbera davantage la chaleur de rayonnement du soleil qu'un vêtement blanc. L'influence des vêtements sur les échanges de chaleur est très complexe et aura davantage tendance à se faire par approximations et estimations (Martinet, 1999).

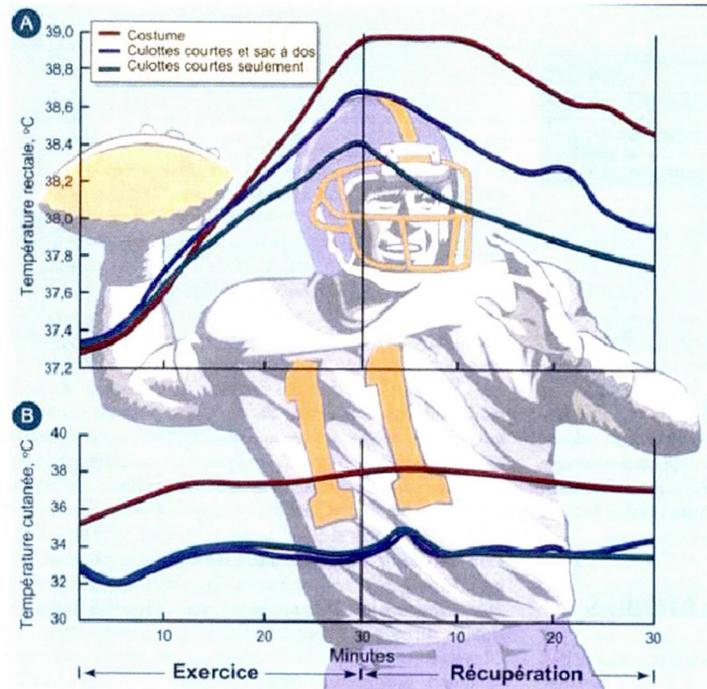


Figure 3.3 Effet de l'habillement sur la température rectale et cutanée lors de l'exercice et de la récupération (McArdle, 2001)

3.4.6 Métabolisme de travail

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 de 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, au travail une fraction de cette énergie produit du travail mécanique. L'excès de chaleur produit par cette augmentation du travail mécanique doit être évacué du muscle vers la peau et induit une élévation de la fréquence cardiaque. Ainsi, plusieurs méthodes existent pour mesurer la dépense énergétique induite par le travail notamment la fréquence

cardiaque, la mesure de la consommation d'oxygène et l'estimation à partir de tables et de modèles. Pour cette étude, la mesure de la fréquence cardiaque ainsi que celle de la VO_2 ont été effectuées.

3.5 Paramètres physiologiques et dépense énergétique

3.5.1 Consommation d'oxygène (VO_2)

La mesure du VO_2 permet d'évaluer le métabolisme avec une précision moyenne de 5% (ISO 8996) à 10% (Astrand et Rodhal, 1994). Elle représente la mesure de la consommation d' O_2 et se base sur la mesure des concentrations en O_2 et CO_2 dans l'air expiré et sur le débit ventilatoire. La prise de cette mesure lors d'un exercice modéré permettra d'observer une augmentation rapide de la consommation d'oxygène pour atteindre un état d'équilibre après 1 à 2 minutes (« steady state »). Par la suite s'établira 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 être affectée par le travail en ambiance chaude. Brouha a démontré dans son étude (1963) que la température ambiante et le taux d'humidité influencent la fréquence cardiaque (FC) sans nécessairement augmenter la consommation d'oxygène. La figure 3.4 représente la comparaison de l'évolution de la FC et de la VO_2 dans le temps selon une ambiance neutre et chaude et humide. Il est possible d'observer qu'en ambiance chaude et humide, la relation entre FC et VO_2 ne reste pas constante; la FC continue d'augmenter malgré un maintien de la consommation d'oxygène constante à travers le temps. De plus, une étude subséquente menée par 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 consommation d'oxygène des pompiers, mais elle en a un sur leur FC.

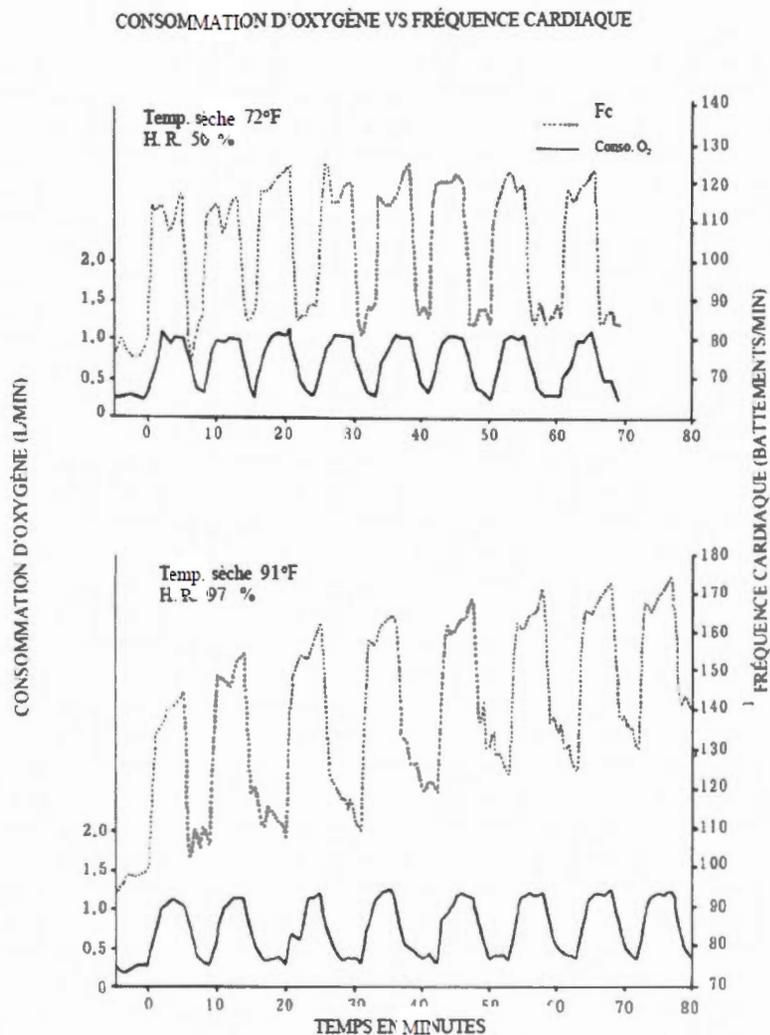


Figure 3.4 Évolution de la FC et de la VO₂ selon une ambiance thermique neutre et chaude (Brouha, 1963)

3.5.2 Fréquence cardiaque

La fréquence cardiaque est un des paramètres d'influence du débit sanguin qui permet l'irrigation des tissus. Celle-ci 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 et 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, 2006), reçoivent normalement environ 20% du débit sanguin. Toutefois, durant l'exercice, l'augmentation du débit cardiaque peut entraîner un apport sanguin aux muscles de l'ordre de 60% du débit sanguin total comme illustré dans la figure 3.5.

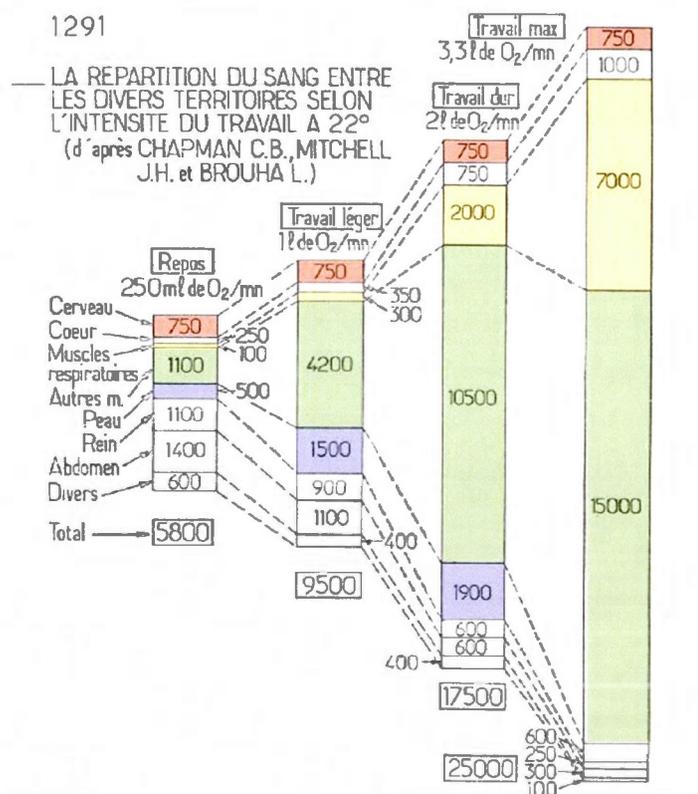


Figure 3.5 Distribution du sang entre les divers territoires selon l'intensité du travail (Chapman, 1961)

La méthode développée par Vogt et Metz (1973) considère que l'élévation de la fréquence cardiaque par rapport à celle au repos est la somme d'une composante thermique (dFCT) liée à l'augmentation de la température centrale, et d'une

composante motrice (dCFM) liée aux efforts musculaires. Il est possible d'isoler la composante thermique de la fréquence cardiaque à l'arrêt du travail, puisque la composante dCFM tend à disparaître en 3 minutes alors que la récupération thermique est beaucoup plus lente. Ceci distingue la mesure du travail à l'aide de la fréquence cardiaque et celle de la VO_2 . La figure 3.6 ci-dessous montre la composante thermique des pulsations cardiaques.

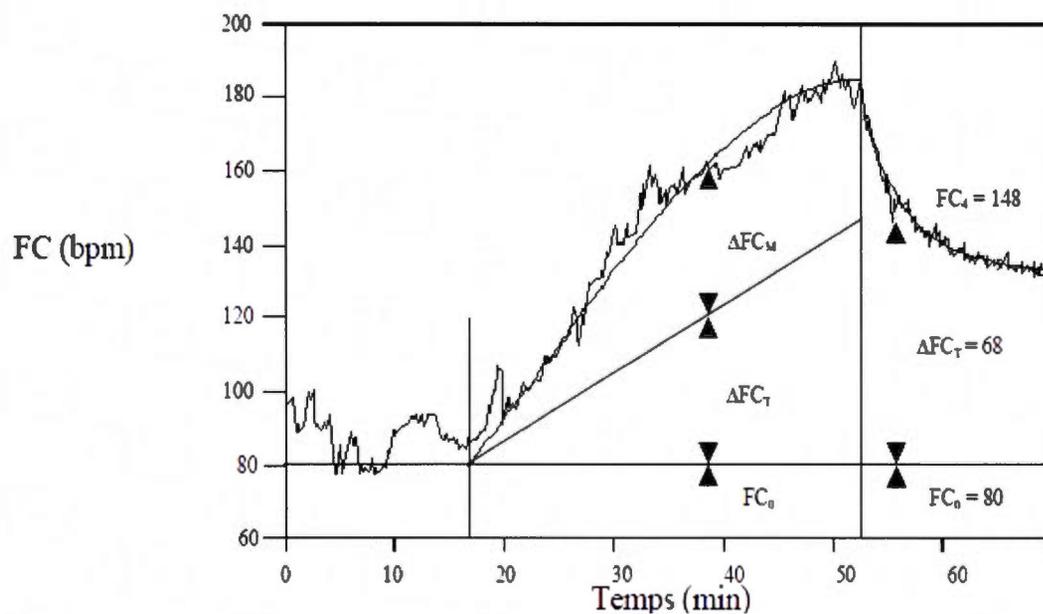


Figure 3.6 Évolution de la FC dans le temps lors d'un travail en ambiance chaude et illustration de la composante motrice (dFC_m) et thermique (dFC_r) (Martinet, 1999)

3.5.3 Observations, tables et normes

L'estimation du métabolisme à partir de tables et de modèles d'activités reste très imprécise. Malchaire (1996) indique une probabilité d'erreur de $\pm 20\%$ alors que Brake et Bates (2002) indiquent jusqu'à 50%. Cette méthode n'est donc présentée qu'à titre indicatif puisqu'elle n'a pas été utilisée pour cette étude. Le tableau 3.1 de

la page suivante est tiré de ISO 11079:2008 et présente la classification du métabolisme énergétique en fonction du type d'activité.

Tableau 3.1 Classification du métabolisme énergétique en fonction du type d'activité (ISO 11079 :2008)

Classe ^a	W · m ²	Exemples
Repos	65	Repos, position assise.
Métabolisme énergétique très faible	80	Travail manuel léger (écriture, frappe à la machine, dessin); inspection, assemblage ou triage de matériaux très légers.
Métabolisme énergétique faible	100	Travail des mains (petits outils d'établi); travail des bras (conduite de véhicule dans des conditions normales, manœuvre d'un interrupteur à pied ou à pédale); usinage avec des outils de faible puissance; marche occasionnelle.
Métabolisme énergétique faible à modéré	140	Travail des mains et des bras à allure modérée; montage et assemblage de matériaux légers.
Métabolisme énergétique modéré	165	Travail soutenu des mains et des bras (cloutage, fraise); travail avec des équipements et des outils légers; travail des bras et des jambes (manœuvre sur chantier de camions, tracteurs ou engins).
Métabolisme énergétique modéré à élevé	175	Travail des bras et du tronc; travail au marteau pneumatique; manipulation intermittente de matériaux modérément lourds; poussée ou traction de charrettes légères ou de brouettes; marche à une vitesse de 4 km/h à 5 km/h; conduite de motoneige.
Métabolisme énergétique élevé	230	Travail intense des bras et du tronc; transport de matériaux lourds, pelletage; travail au marteau; tronçonnage d'arbres; sciage manuel; excavation; marche à une vitesse de 5 km/h à 6 km/h; poussée ou traction de charrettes à bras ou de brouettes lourdement chargées; enlèvement de copeaux de pièces moulées; pose de blocs de béton; conduite de motoneige en terrain lourd.
Métabolisme énergétique très élevé	290	Activité très intense à allure rapide proche du maximum; travail à la hache; pelletage ou excavation à un rythme intensif; action de monter des escaliers, une rampe ou une échelle; marche rapide à petits pas; course; marche à une vitesse supérieure à 6 km/h; marche dans la neige épaisse.
Métabolisme énergétique ultra-élevé (jusqu'à 1 h à 2 h)	400	Activité très intense soutenue sans pause; travail d'urgence et de sauvetage à haute intensité.

^a Le métabolisme énergétique indiqué est basé sur une moyenne de 60 min d'un travail continu en équipe.

3.6 Travail en ambiance chaude et complications

3.6.1 Perte d'eau et déshydratation

Lors du travail en ambiance chaude, la sudation, principal mécanisme de contrôle de la thermorégulation, se met en marche. Toutefois, une sudation abondante et prolongée peut entraîner certains problèmes notamment : un déficit ionique responsable des crampes de chaleurs (que nous aborderons plus bas) et une 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 l/h (Mairiaux et Malchaire, 1990). L'état de déshydratation se produit lorsque ces pertes hydriques ne sont pas compensées par un apport équivalent. Une perte de 1 litre d'eau par la sudation représente environ 2.5% du volume d'eau total d'un adulte (Candas et Botharel, 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 excréments aussi bien liquides que solides. Lors d'un test de 60 minutes réalisé sur un tapis roulant à une vitesse de 3.5km/h en ambiance chaude (45°C), Sköldström (1987) a observé une hausse moyenne du poids du VIP de 674g. 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. Dans le cadre de cette étude, la durée des tests était indéterminée (dépendante de l'atteinte de critère d'arrêt ou d'un arrêt volontaire) ainsi, les valeurs de déshydratation ont, dans certains cas, excédé jusqu'à 3% du poids total du corps.

Tel que mentionné précédemment, le travail en ambiance chaude enclenche des mécanismes de régulation au niveau physiologique permettant au corps de maintenir une température centrale proche de la valeur de référence ($37^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$). Toutefois, la durée d'exposition ainsi que les contraintes thermiques imposées à l'individu, peuvent entraîner une astreinte thermique au-delà des capacités régulatrices du corps. Ces conditions se traduisent par une déperdition de chaleur corporelle à peu près

égale ou largement inférieure à l'équilibre thermique (ISO 14505-3 :2006) et entraînent des conséquences englobées par le terme « 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. La démarcation entre ces troubles reste floue puisque plusieurs symptômes peuvent se chevaucher à mesure que la condition d'un individu se détériore. La figure 3.7 suivante représente la progression de ces troubles liés à la chaleur ainsi que les signes annonciateurs qui y sont associés.

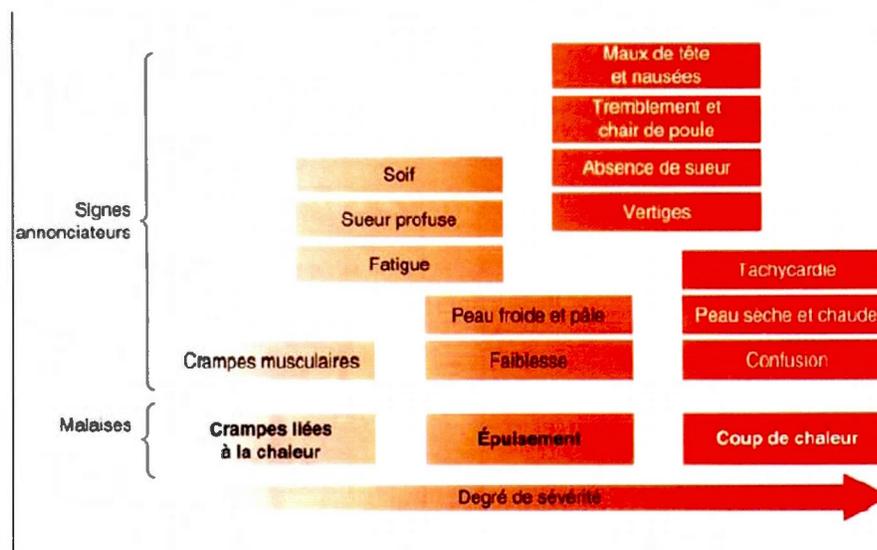


Figure 3.7 Progression des troubles liés à la chaleur et des signes annonciateurs (Wilmore, 2002)

3.6.2 Crampes de chaleur

Des crampes de chaleurs caractérisées par une contraction involontaire de la musculature au niveau des bras, des jambes et de l'abdomen, peuvent se produire pendant, ou quelques heures suivant le travail en ambiance chaude. La cause la plus probable de ce trouble lié à la contrainte thermique en ambiance chaude est le déséquilibre dans la concentration d'électrolytes des fluides corporels (Bergeron,

2003). Durant le travail, à la chaleur, une grande quantité de sel peut être perdue à travers l'évaporation de la sueur sur la peau. Malheureusement, l'ingestion d'eau, afin de remédier à la perte sudorale, est bien souvent faite sans accorder d'attention à remplacer ces réserves de sels. Il est possible de remédier à cette situation en absorbant des liquides contenant une certaine proportion d'électrolyte tels que les boissons sportives vendues en magasin.

3.6.3 La syncope

La syncope ou épuisement dû à la chaleur se caractérise par une perte de conscience soudaine et brève, résultat d'un ajustement circulatoire défaillant (Shibolet et coll., 1976). Celle-ci se produit principalement après une longue période d'inactivité en ambiance chaude alors que le sang s'accumule dans les vaisseaux périphériques dilatés. Le corps tarde à s'adapter lors de la reprise d'une activité, causant une insuffisance du débit sanguin cérébral momentanée. Cette situation peut être similaire à celle ressentie lorsque vient le moment de se lever, après avoir relaxé de longues minutes dans un bain très chaud, alors qu'un étourdissement peut apparaître lors du passage de la position couchée à debout. Lorsqu'elle se produit, la syncope devrait forcer un arrêt immédiat du travail et un repos en ambiance fraîche, idéalement en position couchée. Cette situation est courante chez les individus non acclimatés à la chaleur.

3.6.4 Le coup de chaleur

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 température centrale qui à son tour,

augmente la vitesse du métabolisme et ainsi, la production de chaleur. Les trois signes caractéristiques sont : une peau chaude et sèche suite à un arrêt de la sudation, une température centrale supérieure à 40°C et des signes neurologiques sévères incluant convulsion, coma, délire, agitation, propos incohérents. Bien que rare, cette condition est extrêmement préoccupante puisque la mortalité s'ensuit dans 15 à 25% des cas (Martinet, 1999). La chaleur corporelle élevée entraîne la destruction des membranes cellulaires et de certains systèmes enzymatiques sensible 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 tenter de refroidir le corps le plus rapidement possible. La probabilité de survie et de guérison sans séquelle dépend de la précocité du traitement.

3.6.5 Acclimatation

L'acclimatation se caractérise par un changement de la réponse physiologique d'un individu face à une contrainte thermique. Sous l'effet d'expositions répétées ou prolongées, le corps développe des ajustements permettant une meilleure tolérance à la chaleur. Cet acclimatement est généralement obtenu en effectuant un travail physique à la chaleur de 120 à 240 minutes par jour pour une période de 9 à 12 jours consécutifs (Pandolf 1998). Ces adaptations incluent : un abaissement du seuil de déclenchement du mécanisme sudoral, une augmentation de la sudation, une diminution de la concentration de sel dans la sueur, un abaissement de la fréquence cardiaque lors du travail en ambiance chaude, une utilisation accrue des lipides aux dépens des hydrates de carbone, etc. Il est important de noter que les effets bénéfiques majeurs de l'acclimatation sont perdus de 2 à 3 semaines suivant le retour à du travail en ambiance modéré (Nadel et coll., 1974). La figure 3.8 ci-dessous est tirée d'une étude de Parson (1993) et présente les variations de la température rectale, de la fréquence cardiaque et du débit sudoral au cours de l'acclimatation.

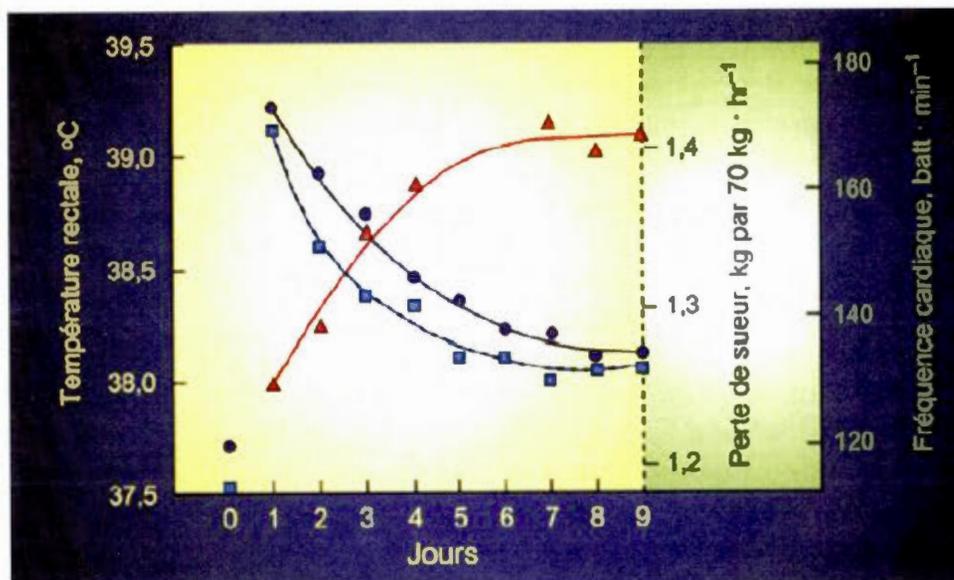


Figure 3.8 Variations de la température rectale (bleu foncé), de la FC (bleu pâle) et du débit sudoral (rouge) au cours de l'acclimation (Parson, 1993)

La figure 3.9 présente l'effet de l'acclimation à la chaleur sur la fréquence cardiaque durant l'exercice. Puisque les conditions de cette étude ont été réparties à raison de deux fois par semaine maximum, un effet d'acclimatation n'a pas pu se développer chez les sujets et compromettre la validité des résultats.

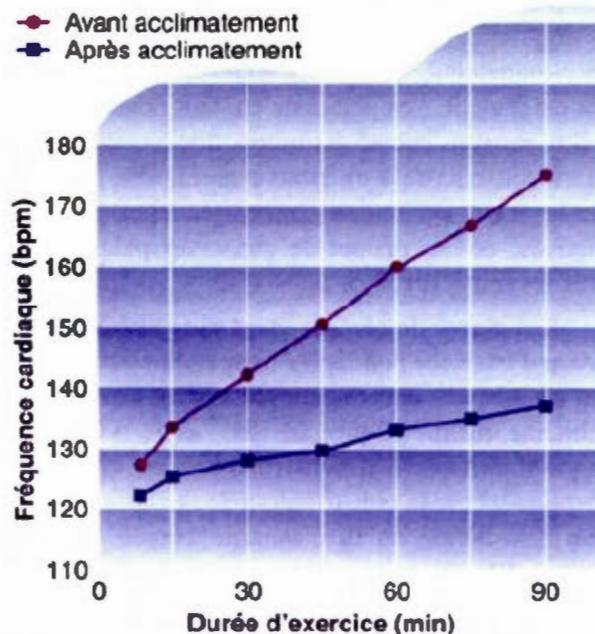


Figure 3.9 Effet de l'acclimatation à la chaleur sur la FC durant l'exercice (Wilmore, 2002)

3.7 Facteurs de variabilité individuels

3.7.1 Âge

Selon Henschel (1969), l'âge aurait un effet significatif sur la tolérance à la chaleur. La diminution de la tolérance observée pourrait s'expliquer par plusieurs facteurs notamment : une diminution de la vasodilatation, une diminution du débit cardiaque et du volume d'éjection systolique (VES) à l'effort, une augmentation du seuil de déclenchement de la sudation et une diminution de la sécrétion sudorale ainsi qu'une diminution des capacités cardio-respiratoires avec l'âge. Selon le document de l'American College of Sport Medicine (ACSM Guidelines, 2000), les personnes âgées de 30 à 39 ans ont une distribution de la consommation maximale d'oxygène qui se situe entre 32.5ml/kg/min et 50.4ml/kg/min.

3.7.2 Sexe

Une différence majeure entre les femmes et les hommes réside dans le fait que les glandes sudoripares des femmes produisent moins de sueur que celles des hommes (Buono et Sjöholm., 1988). Aussi, chez les femmes, le mécanisme de sudation se produit à des températures cutanées et centrales plus élevées que chez les hommes pour une intensité de travail comparable (Dill et coll., 1977). Toutefois, les femmes possèdent un ratio surface cutanée sur masse corporelle plus avantageux que les hommes. Effectivement, les femmes étant généralement plus petites et moins lourdes que les hommes, elles bénéficient d'une plus grande surface corporelle exposée à l'environnement pour dissiper la chaleur. Ainsi, sous des conditions thermiques identiques, les femmes se refroidissent à un rythme plus rapide que les hommes à travers une plus petite masse corporelle répartie sur une plus grande surface. Les premières études portant sur la comparaison de thermorégulation entre les hommes et femmes semblaient démontrer que les hommes présentent une meilleure tolérance à la chaleur que les femmes durant l'exercice. Toutefois, les sujets étudiés n'avaient pas été comparés en tenant compte de leur capacité aérobie relative. Une fois ce facteur contrôlé, les différences de thermorégulation se sont avérées beaucoup moins prononcées menant au constat que les femmes peuvent s'acclimater et tolérer une contrainte thermique aussi bien que les hommes de capacité cardiorespiratoire comparables (Stephenson et coll., 1993). Finalement, le cycle menstruel peut être un facteur de variabilité affectant la réponse thermorégulatrice lors de l'activité physique ou en ambiance chaude. Tel que noté par Wells (1979), le changement dans la sensibilité thermorégulatrice durant la phase lutéale du cycle menstruel ne semble pas affecter la capacité de la femme à effectuer un exercice important durant le cycle menstruel. Toutefois, ces changements doivent être considérés lors de l'évaluation de la réponse thermorégulatrice à l'exercice ou en ambiance chaude. Pour cette étude, seuls des hommes ont été sélectionnés afin de limiter la variabilité des résultats et simplifier l'analyse.

3.7.3 Poids

Un pourcentage de gras élevé peut devenir une contrainte lors du travail en ambiance chaude. Les tissus graisseux sous-cutanés augmentent l'isolation thermique du corps et retardent la conduction de chaleur des muscles vers la périphérie (Savastano et coll., 2009). Une personne en surpoids possède également un plus petit ratio de surface cutanée sur masse corporelle qu'une personne plus mince ce qui nuit aux échanges par évaporation (Bar-Or et coll., 1969). Finalement, un excès de poids augmente le coût métabolique du travail mécanique à cause d'un plus petit ratio de masse maigre sur masse totale. Les personnes obèses seraient d'ailleurs 3.5 fois plus à risque d'accidents cardio-vasculaires que les individus possédant un poids corporel à l'intérieur de limites acceptables (Henshel, 1969, Wilson et coll., 2002). Afin de contrôler ce facteur de variabilité, les sujets sélectionnés devaient présenter un pourcentage de gras égal ou inférieur à 15%.

3.7.4 Alimentation, alcool et médicaments

L'alimentation et la prise d'alcool ou de médicaments peuvent avoir plusieurs répercussions sur la tolérance à la chaleur. Ces habitudes peuvent se traduire par des actions directes sur les mécanismes de thermorégulation (telle que la vasodilatation périphérique causée par la consommation d'alcool) ou par un comportement inadapté de ces derniers. L'ingestion de nourriture crée une hausse du métabolisme généralement observée dans les heures qui suivent la prise du repas. Le travail du tube digestif ainsi que celui associé à la transformation des aliments absorbés expliquent cette élévation. L'absorption d'un repas copieux peut influencer le métabolisme jusqu'à 4h après son ingestion (Scherrer, 1981). Pour cette étude, les sujets avaient comme instruction de prendre un repas léger 2 à 3h avant l'arrivée dans le laboratoire, ce qui devait laisser le temps aux effets de la digestion de se dissiper.

Des notes ont été prises quant à la consistance et l'heure de leur dernier repas et/ou collation.

3.8 Vêtements individuels de protection

La composition des habits de pompiers actuels est relativement semblable, elle consiste en une composition de trois couches superposées : le revêtement extérieur résistant au feu (Nomex, Kevlar, etc.), l'écran humidifuge (membrane coupe-vapeur) et la doublure thermique. Cet habit fournit donc au pompier une barrière thermique efficace contre la chaleur et le feu. Le tableau 3.2 ci-dessous présente les VIP issus de deux compagnies différentes (A et B), ayant été utilisés dans l'étude de Marchand et coll. (2006) afin d'illustrer les similitudes de composition et de poids entre plusieurs VIP standards.

Tableau 3.2 Composition et poids de 5 VIP utilisés pour l'étude de Marchand et coll. (2006)

Nom de référence	Compagnie	Composants	Poids
VIP 1	A	5 7,0 oz 55 % filam.Nomex/45 % Kev V 5,0 oz Crosstech on Nomex PJC Z 7,5 oz Aramid Batt Quilt/Nomex	4,6 kg
VIP 2	B	Revêtement ext. : Gladiator Membrane : Crosstech Doublure : XE 289	5,0 kg
VIP 3	A	H 6,0 oz 50 % filam.Kev/50 % Nomex V 5,0 oz Crosstech on Nomex PJC Y 7,0 oz Aramid Batt Lami/Nomex	4,4 kg
VIP 4	B	Revêtement ext. : Guardian 790 Membrane : Crosstech Doublure : Caldura	4,9 kg
VIP 5	A	5 7,0 oz 55 % filam.Nomex/45 % Kev V 5,0 oz Crosstech on Nomex PJC 4 6,7 oz Nomex/1xE89 Nomex	4,5 kg

3.8.1 Matériau à changement de phase (MCP)

Le matériau à changement de phase (MCP) représente un système de thermorégulation de la température corporelle: Ce système se présente sous forme de sachets de 6.5 cm x 7.5 cm x 0.5 cm installés à l'intérieur du VIP et contenant un matériau composite à changement de phase novateur à base de sels hydratés ignifuges (voir figure 3.10-A). Le MCP est un média de stockage de chaleur. Lorsqu'installé à l'intérieur d'un VIP, le MCP permet d'absorber l'excès de chaleur généré par le corps lors d'activités intenses, permettant ainsi de réguler la température corporelle en donnant un effet de rafraîchissement. L'absorption de chaleur est possible grâce à la transition de phase solide-liquide du matériau, avec une température de transition variant entre 25 et 32°C. Les essais effectués lors de cette étude ont permis d'évaluer l'impact des différentes conditions sur les paramètres physiologiques liés à la thermorégulation en plus d'évaluer l'appréciation des sujets en rapport avec cette nouvelle technologie, ce qui pourra aider à l'optimisation des prototypes développés en fonction des besoins des travailleurs.

CHAPITRE IV

MÉTHODOLOGIE

4.1 Sujets

Pour cette étude, huit sujets ont été recrutés sur une base volontaire parmi les étudiants inscrits au programme d'intervention en activité physique de l'UQAM. Les sujets sélectionnés étaient non-fumeurs et en bonne capacité cardio-respiratoire (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 cardio-respiratoire sur tapis roulant a permis d'établir que la VO_2 des sujets se situait entre 35 et 65 ml/kg/min (exceptionnellement, un sujet a été accepté avec un VO_2 de 66.14ml/kg/min). De plus, puisque le pourcentage de gras peut influencer la dissipation de la chaleur lors de la thermorégulation, les sujets recrutés devaient avoir un pourcentage de gras égal ou inférieur à 15%. Un questionnaire QAAP a été rempli afin de s'assurer de leur état de santé (ACSM, 2000). 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 2 heures avant l'évaluation;
- Ne pas prendre de drogue ou stimulant 12 heures avant l'évaluation;
- Faire la liste de la nourriture ingérée 12 heures avant l'évaluation;
- Boire 1 litre d'eau 2 heures avant et un autre 500 ml 30 minutes avant le test.

Les sujets ont porté les vêtements spécifiés par les chercheurs. Pour les tests sous-maximaux, le port d'espadrilles, d'un sous-vêtement, d'une paire de shorts et d'un T-

shirt était requis. Lors du déroulement des conditions, les sujets devaient porter sous le VIP, un T-shirt, un sous-vêtement et des chaussettes (fournis par l'expérimentateur). Le port de l'équipement complet n'est pas requis par la méthode ASTM F2300-10 et fut donc restreint aux parties limitant la dissipation de la chaleur du corps vers l'environnement soit : le harnais relatif à l'appareil de protection respiratoire (sans la bonbonne) ainsi que des espadrilles de courses. Les VIP ont été nettoyés selon les spécifications du manufacturier avant le début des essais. Afin de participer à l'étude, chaque sujet a signé un formulaire de consentement pour la présélection (annexe A), ainsi que pour la participation à l'étude. Le formulaire de consentement ainsi que le QAAP sont présentés à l'annexe B et C respectivement. La participation a été rémunérée à titre d'assistant de recherche selon le taux horaire prévu par la convention collective du SÉTUE à l'UQAM. Le tableau 4.1 contient les informations relatives à chaque sujet

Tableau 4.1 Caractéristiques des sujets de l'étude

Sujet	Âge	Taille (cm)	Poids (kg)	% gras	VO ₂ max estimé (ml/kg/min)
PO-P01	24	185.5	89.66	7.4	66.14
PO-P02	21	173.0	80.26	15.0	55.44
PO-P03	22	181.0	86.7	11.6	62.04
PO-P04	24	185.0	73.5	11.2	51.23
PO-P05	22	174.7	66.44	5.7	51.79
PO-P06	28	173.0	77.80	10.9	60.80
PO-P07	21	177.0	89.44	12.0	42.41
PO-P08	22	180.3	81.40	11.5	55.56

4.2 Test de prédiction de la consommation d'oxygène maximale

Selon plusieurs physiologistes, le test de consommation d'oxygène maximale est considéré comme le meilleur indice de la capacité d'endurance cardio-respiratoire (Wilmore et Costill, 2002). Toutefois, les risques associés à de tels tests ne sont pas à négliger. Tel que mentionné par Scherrer et coll. (1981) : « La capacité aérobie peut être déterminée avec des épreuves de travail maximal. Il s'agit en fait d'épreuves pénibles puisque l'on demande au sujet d'exécuter un effort qui aboutit à l'épuisement complet et sollicite au maximum les fonctions respiratoires et cardiaques. Ces épreuves peuvent être dangereuses chez les sujets déficients. Des cas d'infarctus du myocarde, provoqués lors d'une épreuve de travail maximal, ont déjà été rapportés ». Afin d'éliminer la nécessité d'une présence médicale lors de la conduite de ces tests, la valeur maximale de la VO_2 a été extrapolée à l'aide d'un test sous-maximal. L'expérimentation était interrompue si le sujet atteignait 85% de sa fréquence cardiaque maximale $[(220 - \text{âge}) \times 85\%]$ (ACSM, 2000). Ce test se conforme aux recommandations de la norme ISO 8996 :2004 à laquelle la méthode d'essai normalisée ASTM F2300-10 fait référence.

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 5 minutes, la fréquence cardiaque de repos est prise
3. Instrumenter le sujet : installer le masque et le casque pour tenir l'embout de l'analyseur CO₂ et O₂
4. Expliquer les techniques de marche sur tapis roulant au sujet et laisser le sujet 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 (5.5km/h à 0% d'inclinaison) durant 5 minutes. Cette phase constitue l'échauffement et elle précède le test.
6. Par la suite, le sujet effectue son test de prédiction sous-maximal de 6 paliers :
 - a. Le 1^{er} palier a une durée de 3 minutes, une vitesse de 5.5km/h et une pente de 2.5% (4 METs)
 - b. Le 2^{ème} palier a une durée de 3 minutes, une vitesse de 5.5km/h et une pente de 5% (5 METs)
 - c. Le 3^{ème} palier a une durée de 3 minutes, une vitesse de 5.5km/h et une pente de 7.5% (6 METs)
 - d. Le 4^{ème} palier a une durée de 3 minutes, une vitesse de 5.5km/h et une pente de 10% (7 METs)
 - e. Le 5^{ème} palier a une durée de 3 minutes, une vitesse de 5.5km/h et une pente de 12.5% (8 METs)
 - f. Le 6^{ème} palier a une durée de 3 minutes, une vitesse de 5.5km/h. Lors de ce palier, la pente du tapis roulant a été 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.
7. La fréquence cardiaque et la consommation d'oxygène maximale ont été mesurées durant toute la durée du test sous-maximal

8. Une fois le test complété, le sujet devait terminer avec une marche lente de 3-5 minutes afin de favoriser le retour veineux et d'abaisser les fréquences cardiaques à un niveau adéquat (<100bpm)

Le test a été effectué dans une tenue sportive (short, T-shirt 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'équilibres. Durant le test, ces rampes ne devaient pas être maintenues 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.

4.3 Conditions

Cette étude permettait d'évaluer l'efficacité d'un système d'absorption de la chaleur composé de matériau à changement de phase (MCP) tel que décrit plus haut. Pour ce faire, les contraintes thermophysiques associées au port d'un VIP standard ont été comparées à celles où une technologie de MCP était incorporée au vêtement. Trois conditions expérimentales (une qui était répétée deux fois pour un total de 4) ont été comparées lors d'un test sur tapis roulant dans des conditions environnementales contrôlées. Voici les détails de ces conditions expérimentales, considérées ici comme les variables indépendantes de l'étude :

1. Condition Standard : VIP standard seulement
2. Condition MCP : VIP standard + MCP avec la charge externe du VIP standard
3. Condition Contrôle : VIP standard + Substance contrôle ayant un poids égal au MCP avec la charge externe du VIP standard

Les VIP incluant les MCP, développés par le Groupe CTT et ses partenaires industriels, n'avaient jamais été étudiés par des essais thermophysiques. Afin de

faire ressortir l'efficacité des MCP pour cette étude, il était important d'effectuer une situation avec une substance contrôle qui offrait un poids et une surface de contact équivalente. Ainsi, des pochettes de plastique de taille similaire à ceux utilisés pour les MCP ont été remplies de sable (voir figure 4.1-B) et pesées de manière à avoir le poids exact des pochettes MCP intégrées à l'intérieur du VIP (voir figure 4.1-A). La disposition des pochettes de sable était la même que celle du MCP, afin d'obtenir des conditions aussi similaires que possible.

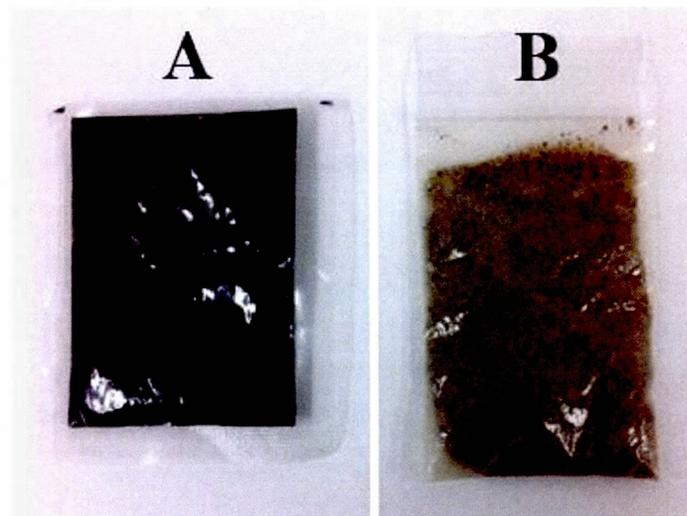


Figure 4.1 Pochette de MCP (A) et pochette de sable (B) utilisée dans cette étude

Puisque les MCP ne peuvent être incorporés directement aux vêtements individuels de protection, un prototype de veste a été développé afin de contenir le matériau. Dans une optique d'efficacité, trois caractéristiques principales ont dû être respectées. Premièrement, afin d'éviter d'influencer le coût énergétique des conditions, la veste se devait d'être la plus légère possible ainsi, le choix du tissu à utiliser était crucial. Ensuite, comme le tissu de la veste représentait une barrière supplémentaire à l'échange thermique entre les MCP et le corps, le tissu se devait d'être très perméable à l'air. Finalement, dans une optique de confort et d'efficacité, une certaine souplesse et élasticité était recherchée afin que les MCP puissent mouler le corps du sujet sans

toutefois restreindre sa mobilité. Le prototype développé a donc été confectionné à l'aide d'un dossard en tulle de nylon (« mesh »), matériel idéal en terme de poids et de perméabilité à l'air (voir figure 4.2). Cette veste, constituée de 3 panneaux s'assemblant à l'aide de velcro, a été munie de 40 pochettes cousues à même le vêtement, permettant de contenir les pochettes MCP ou celles contenant le sable (voir figure 4.3) qui servaient à établir une condition de contrôle du poids sans les propriétés d'absorption de la chaleur.



Figure 4.2 Veste prototype, permettant de contenir les sachets de MCP dans leur forme assemblée



Figure 4.3 Intérieur de la veste prototype où l'on peut apercevoir les pochettes cousues, permettant de contenir les sachets de MCP

L'ensemble du protocole expérimental respectait la méthode d'essai normalisée ASTM F2300-10 « *Standard Test Method for Measuring the Performance of Personal Cooling Systems Using Physiological Testing* » (ASTM F2300-10). Les tests sur le tapis roulant étaient d'une durée minimale de 30 minutes. Les tests ont été prolongés jusqu'à un arrêt volontaire du participant ou jusqu'à ce qu'un des critères d'arrêt stipulé dans la méthode d'essai normalisée ASTM F2300-10 fut atteint. Les tests sur le tapis roulant étaient effectués à une charge externe équivalente à 250 Watts ou à une charge externe suffisante afin de produire une réponse thermorégulatrice chez le participant. Cette charge a été atteinte en réglant la vitesse à 5.5 km/h et en ajustant la pente (voir équation 4.1). Le port d'un VIP augmente considérablement l'intensité de l'exercice. Ainsi, le poids du VIP et de l'équipement était ajouté à celui du sujet lors du calcul du travail externe moyen qui tient compte de la vitesse (temps et distance parcourue) et de la pente du tapis roulant. La charge physiologique imposée par le tapis roulant était la même pour les trois conditions puisque le poids des MCP et de la condition contrôle n'ont pas influencé de façon significative la consommation d'oxygène lors des tests. En effet, si les conditions deux et trois (condition MCP et Contrôle) avaient augmenté la consommation d'oxygène de manière significative durant les premières minutes, des conditions supplémentaires auraient pu venir s'ajouter où la pente du tapis roulant aurait été ajustée pour correspondre à la charge physiologique obtenue lors de l'évaluation du VIP standard. Ces tests se sont déroulés en ambiance chaude dans une chambre climatique où la température était stable à 35°C ($\pm 0.5^\circ\text{C}$) et l'humidité relative à 50% ($\pm 5\%$). La substance contrôle qui a été utilisée lors de la condition contrôle était du sable, réparti dans des pochettes de plastiques d'une grandeur égale à celles des MCP et disposé de manière identique sur le sujet.

Lors de ces tests, la consommation d'oxygène a augmenté rapidement pour atteindre un état d'équilibre après environ 2 minutes. Après ces premières minutes, la

consommation d'oxygène a atteint un plateau, ce qui représentait le coût énergétique qui correspondait à l'intensité demandée. Dans la présente étude, il a été possible d'observer dans certains cas que la consommation d'oxygène a continué d'augmenter lentement après le « Steady State ». On appelle cette augmentation, la composante lente de la cinétique de la VO₂. Gaesser et Poole (1988) justifient cette augmentation par l'augmentation du coût énergétique qui résulte de: 1- l'augmentation de la ventilation, 2- l'utilisation progressive des glucides plutôt que des lipides, 3- l'élévation de la température corporelle. Pour Barstow et coll. (1996) cette augmentation de la consommation d'oxygène serait plutôt attribuable au recrutement de plus en plus important des fibres rapides. Chez des sujets non entraînés, ce seuil aérobie est à 50-60% de leur VO₂ max et pour des sujets entraînés, ce seuil atteint les 70-80% de leur VO₂ max (Wilmore et Costill, 2002).

Ces recherches rapportées dans la littérature permettaient de justifier l'utilisation d'une intensité correspondante à 250 Watts. Cette intensité a été choisie pour maintenir une charge cardio-respiratoire qui se situe en deçà de 85% de la fréquence cardiaque maximale pendant la durée complète des tests avec les VIP. Pour obtenir cette intensité, la pente du tapis roulant a été ajustée en fonction de l'équation fournie dans la méthode d'essai normalisée ASTM F2300-10 qui est présentée ici-bas.

Équation 4.1 : Charge de Travail Externe

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

Où CTE représente la charge de travail externe, m représente la masse en kilogrammes du sujet, g représente l'accélération gravitationnelle, %pente représente le pourcentage d'inclinaison du tapis roulant, D représente la distance parcourue en mètres et T le temps écoulé en secondes.

4.4 Variables dépendantes

4.4.1 Consommation d'oxygène (VO₂)

Cette variable a servi à quantifier la contrainte mécanique et énergétique exercée sur le système musculaire et cardio-respiratoire à travers la mesure de la ventilation ainsi qu'à quantifier la production d'O₂ et de CO₂ pour les différentes conditions de l'étude. Ces données ont été recueillies aux 15 secondes à l'aide d'un analyseur métabolique (MOXUS modular VO₂ 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.

4.4.2 Fréquences cardiaques

Cette variable représente l'effort que le cœur doit fournir afin de répondre aux besoins engendrés selon diverses situations d'exercice ou de repos. Ces données ont été recueillies aux 15 secondes à l'aide d'un analyseur métabolique (MOXUS modular VO₂ System) muni d'un cardiofréquencemètre (POLAR Model RS800) afin d'obtenir un couple FC/VO₂ précis. Pour cette étude, la FC a également servi à observer l'effet de la contrainte thermique produit par l'environnement et le VIP puisque, lorsque la température corporelle augmente, les besoins en thermorégulation s'ajoutent à ceux de la contrainte musculaire imposée par l'exercice et contribuent à augmenter le rythme cardiaque.

4.4.3 Température cutanée

Cette variable a permis de déterminer la température globale de la peau selon une équation tenant compte de plusieurs zones mesurées. Cette équation correspond à la norme ISO 9886 :2004 à laquelle réfère la méthode d'essai normalisée ASTM F2300-10. Ces données ont été recueillies à l'aide de huit senseurs (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 senseurs ont été conçus pour mesurer des températures moyennes variant entre 20°C et 40°C avec une précision de $\pm 0.1^\circ\text{C}$ et une lecture aux 15 secondes. La température globale de la peau a été mesurée selon l'équation 4.2 ci-après. Les constantes de l'équation représentent le ratio de la surface corporelle en contact avec l'environnement.

Équation 4.2 : Température globale de la peau

$$\begin{aligned}
 T_{\text{peauMoy}} = & (\text{Front} \times 0.07) + (\text{Omoplate droite} \times 0.175) \\
 & + (\text{Poitrine Gauche} \times 0.175) + (\text{Bras droite} \times 0.07) \\
 & + (\text{Avant - bras gauche} \times 0.07) + (\text{Main gauche} \times 0.05) \\
 & + (\text{Cuisse droite} \times 0.19) + (\text{Mollet gauche} \times 0.20)
 \end{aligned}$$

4.4.4 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 de température 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 $\pm 0.1^\circ\text{C}$.

4.4.5 Pression artérielle et saturation de l'hémoglobine

La pression artérielle, la fréquence cardiaque et la saturation d'oxygène via l'hémoglobine ont été mesurées de 10 à 15 minutes avant et après chaque test à l'aide d'un tensiomètre automatisé (Spot Vital Signs® Devices, Welch Allyn). Ces variables sont mesurées dans l'optique d'investiguer s'il y a des variations de ces paramètres physiologiques, ainsi que pour vérifier l'éligibilité du participant à effectuer la tâche sans risque. Une pression artérielle supérieure à 135 mmHg au niveau systolique ou une pression diastolique supérieure à 85 mmHg ne permet pas au participant de poursuivre le test d'effort. Trois prises de mesure subséquentes ont permis d'obtenir une moyenne pré et post test pour chaque condition. La mesure post test a également été effectuée afin de vérifier si le participant avait récupéré de manière adéquate avant de le laisser quitter les lieux de l'expérimentation.

4.4.6 Taux d'hydratation

Cette variable a été mesurée avant et après chaque test afin d'observer l'effet du travail en ambiance chaude lors du port d'un VIP sur le taux d'hydratation et les changements de la composition corporelle (masse maigre squelettique) des participants. La prise de mesure s'est effectuée à l'aide de la technique d'analyse d'impédance bioélectrique multifréquence (BIA) permettant d'évaluer l'état d'hydratation des participants. Cette méthode consiste à mesurer la composition et l'état d'hydratation grâce à un flux électrique traversant le corps humain. Plus spécifiquement, le BIA mesure l'opposition que rencontre un courant électrique de faible intensité lorsqu'il passe dans le corps via l'eau contenue à l'intérieur et à l'extérieur des cellules. Cette méthode est indolore, sécuritaire et a été validée par comparaison au Gold Standard, et à la dilution isotopique (Armstrong, 2005). En

effet, le BIA permet de mesurer l'eau totale (TBW), intra (ICW) et extracellulaire (ECW), ainsi que la masse maigre.

4.4.7 Perte hydrique

Cette variable a permis de déterminer la perte de fluide occasionnée selon les différentes conditions à l'étude. Ces données ont été calculées 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 sudation 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). Cette variable a permis d'évaluer la sévérité de l'astreinte sudorale imposée par le port des différents VIP étudiés.

4.4.8 Mesures psychophysiques

Cette variable a permis de compléter les méthodes physiques et physiologiques d'évaluation des différentes conditions expérimentales. Selon Sköldstrom (1987), les tests psychophysiques ont une relation linéaire avec l'intensité de l'exercice. Lors d'une étude faite avec des pompiers, il a observé une forte corrélation entre l'évaluation psychophysique et les fréquences cardiaques, révélant que les pompiers sont très conscients des contraintes physiologiques que le poids de l'équipement et la chaleur leur imposent. Cette variable a été mesurée à l'aide de l'échelle de Borg 6-20 (figure 4.1), correspondant au fait que chez les jeunes adultes, la fréquence cardiaque varie généralement de 60 à 200 battements par minute. Ceci correspond donc à la plage entre l'état de repos et la fréquence cardiaque maximale. Durant toute la séquence, le participant devait transmettre à l'expérimentateur sa perception de l'effort. La mesure était prise :

- Aux 5 minutes durant les 20 premières minutes du test
- Aux 2 minutes 30 secondes durant les minutes 20 à 30 du test
- Aux 2 minutes entre les minutes 30 à 60 du test
- À chaque minute au-delà de 60 minutes du test.

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

Échelle de Borg

	6	
très très facile	7	very very easy
	8	
très facile	9	very easy
	10	
assez facile	11	fairly easy
	12	
un peu difficile	13	somewhat hard
	14	
difficile	15	hard
	16	
très difficile	17	very hard
	18	
très très difficile	19	very very hard
	20	

Figure 4.4 Représentation des niveaux d'effort utilisés pour mesurer la perception psychophysique des participants selon l'échelle de Borg 6-20.

4.5 Variables extrinsèques et environnementales

4.5.1 Sujets

Les conditions expérimentales étaient reproduites avec le plus d'exactitude possible d'un sujet à l'autre et pour un même sujet, afin de limiter les variations inter et intra-individuelles. Les différentes conditions se sont déroulées autant que possible au même moment de la journée pour un même participant afin de limiter les variations physiologiques liées au rythme basal.

La dépense énergétique totale et la dépense énergétique liée à l'activité physique des participants étaient mesurées à l'aide d'un brassard (Armband Sensewear Bodymedia) au moins 24h avant les tests afin de déceler toute irrégularité dans la journée précédant les tests. De plus, lorsqu'il était possible pour les sujets de le porter 7 jours d'avance, la dépense énergétique était mesurée pour la semaine précédant les tests, permettant de comparer la moyenne de la dépense énergétique totale journalière habituelle, sur les 24 heures avant les tests. Le brassard enregistre l'information de la dépense énergétique journalière, la dépense énergétique lors d'activité physique, la température corporelle, les réponses électriques de la peau, les mouvements et accélération du corps ainsi que la température ambiante. Les résultats de la dépense énergétique journalière et hebdomadaire sont présentés à l'annexe E. Les conditions pré-test ont été bien respectées pour l'ensemble des sujets.

Chaque participant a été avisé 24 à 48 heures avant l'expérimentation des conditions à suivre préalablement au test, tel que ne pas consommer d'alcool ni de caféine et de ne pas prendre un repas trop riche avant la rencontre. De plus, un questionnaire visant à vérifier le respect des conditions préalables, ainsi qu'un bilan du dernier repas, étaient demandé au participant à l'arrivée sur les lieux de l'expérimentation.

4.5.2 Chambre climatique

La température ainsi que l'humidité relative étaient contrôlées par le panneau de configuration de la chambre climatique et mesurées afin de correspondre à la méthode d'essai normalisée de l'ASTM F2300-10. Les variations de température de l'air et d'humidité relative n'ont pas excédé $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ et $\pm 5\%$ de la moyenne enregistrée pour une période de mesure de 5 minutes respectivement. Les données ont été mesurées à l'aide d'un appareil moniteur d'environnement thermal QuesTEMP^o 32. Cet appareil a également permis d'assurer que la température radiante moyenne ait une différence maximale de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ avec la température de l'air enregistrée pour une période de mesure de 5 minutes. Cet appareil de mesure était positionné sur un trépied à une hauteur d'environ 1 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 de mesurer la vitesse de l'air avec précision avant le début de la série de tests; ces valeurs ne devaient pas varier de $\pm 20\%$ de la moyenne enregistrée pour une période de mesure de 5 minutes.

4.6 Procédure

Tous les tests ont été réalisés avec un seul sujet par demi-journée et les sujets devaient se présenter à 4 reprises pour cette étude. À son arrivée, le sujet était informé verbalement du déroulement de l'expérience. Ces informations lui ont été présentées sur le formulaire de consentement qui lui était 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 phase de

familiarisation, ainsi une condition était sélectionnée aléatoirement afin d'accoutumer le sujet au port des différents appareils et au déroulement des tests. Cette journée était écartée de l'analyse statistique ce qui a permis entre autres de limiter les effets de laboratoire sur des variables sensibles telles que la FC et la tension artérielle. Préalablement à l'arrivée du sujet, plusieurs étapes devaient être complétées afin de permettre une collecte des données fiables. La liste de vérification ayant été utilisée lors des tests est présentée à l'annexe D du présent document toutefois, les grandes étapes de préparation préalable à l'arrivée du sujet sont énumérées ci-dessous :

1. Communiquer avec le sujet 24h à l'avance afin de s'assurer qu'il respecte les conditions préalables
2. Préparer le QuesTEMP° 32 et le mettre dans la chambre climatique
3. Calibrer l'appareil de mesure de la consommation d'oxygène (Moxus) 15 minutes après le démarrage du système de pompe régulatrice de débit
4. Régler et démarrer la chambre climatique à 35°C et 50% d'humidité
5. Mettre en route les différents logiciels de cueillette de données
6. Établir la condition du jour de manière aléatoire
7. Activer la sonde de mesure de la température corporelle interne
8. Peser le VIP
9. Peser la veste contenant le MCP ou la substance contrôle (si applicable)
10. Apporter le défibrillateur dans la salle de test

Les grandes étapes de préparation à l'arrivée du sujet sont énumérées ci-dessous :

1. Demander au sujet d'avaler la pilule ainsi que le 500ml d'eau requis et noter l'heure de consommation
2. Vérifier si les conditions préalables ont été respectées, sinon noter les manquements
3. Noter la constitution du dernier repas consommé et l'heure de consommation

4. Expliquer le déroulement de la séance, les mesures de sécurité et autres consignes importantes au sujet
5. Télécharger les données du «Armband Sensewear Bodymedia» et le recharger. Vérifier que le sujet a respecté la condition concernant l'activité physique dans les 24h précédent le test
6. Asseoir le sujet 5 minutes et prendre la fréquence cardiaque de repos, la tension artérielle ainsi que le pourcentage d'oxygénation sanguine à 3 reprises
7. Effectuer la pesée des vêtements de corps qui seront portés par le sujet sur une balance de précision
8. Permettre au sujet d'aller uriner et éviter à partir de ce point la consommation d'eau et l'utilisation de la salle de bain
9. Prendre le poids du sujet en sous-vêtement
10. Prendre le taux d'hydratation du sujet à l'aide de l'appareil BIA
11. Poser le cardio fréquencemètre et les capteurs de température externe sur le sujet
12. Vérifier la température et l'humidité de la chambre climatique et noter les valeurs afin de s'assurer qu'elle respecte les valeurs $35^{\circ}\text{C}\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ et $50\%\pm 5\%$ d'humidité
13. Poser le brassard Équivital par-dessus le chandail du sujet et par-dessus la veste contenant les MCP ou la substance contrôle (si applicable)
14. Placer le masque et le casque permettant de mesurer la consommation d'oxygène du sujet
15. Enfiler l'habit de pompier du sujet, les souliers, le harnais du tapis roulant et finalement le harnais de support de l'appareil respiratoire autonome
16. Prendre le poids du sujet avec tous les équipements
17. Prendre la fréquence cardiaque du sujet debout

18. Déterminer la pente du tapis roulant et la charge de travail externe associé
19. Faire entrer le sujet dans la chambre climatique, connecter les tubes de l'appareil de mesure de la consommation d'oxygène au masque du sujet et attacher le harnais du sujet au système d'arrêt d'urgence du tapis
20. Commencer l'acquisition des différents systèmes (Moxus, Equivital, Biopac) et démarrer le tapis roulant à 5.5 km/h et à l'inclinaison requise
21. Noter l'heure de début du test

Les grandes étapes de la prise de données suite à l'arrêt du test sont énumérées ci-dessous :

1. Noter la durée totale du test
2. Arrêter le tapis roulant et le fonctionnement de la chambre climatique
3. Sortir le sujet et le peser avec tous les équipements
4. Retirer tous les équipements du sujet
5. Peser le sujet en sous-vêtement
6. Prendre le taux d'hydratation du sujet à l'aide de l'appareil BIA
7. Hydrater le sujet
8. Une fois 10 minutes écoulées depuis l'arrêt du test, prendre la fréquence cardiaque de repos, la tension artérielle ainsi que le pourcentage d'oxygénation sanguine à 3 reprises
9. Effectuer la pesée des vêtements de corps portés par le sujet sur une balance de précision
10. Peser le VIP
11. Faire passer un questionnaire de mesure de la perception de déshydratation au sujet
12. Arrêter les différents systèmes d'acquisition et noter l'heure
13. Noter les événements particuliers
14. Surveiller le sujet pour un minimum de 15 minutes en ambiance contrôlée

15. Nettoyer les différents instruments de mesure

16. Sauvegarder et archiver les données

4.7 Limites

Cette étude, réalisée au Québec, comptait un échantillon de huit sujets provenant de l'UQAM. Cet échantillon a été retenu en considérant les études antérieures sur le sujet, la méthode d'essai normalisée ASTM F2300-10 et le souci d'obtenir un échantillon statistiquement significatif. L'étude n'était pas réalisée dans des situations réelles de travail, mais plutôt en laboratoire afin d'être en mesure de standardiser la charge de travail. Ces mesures visaient à obtenir des conditions comparables afin de pouvoir quantifier l'effet physiologique du port du VIP standard, avec MCP ou avec une substance contrôle lors du travail en ambiance chaude.

4.8 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 accord 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, et perception psychophysique. La comparaison des effets principaux a été effectuée avec un ajustement de l'intervalle de confiance (Bonferroni) pour l'ensemble des tests, exception faite des analyses où le niveau 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 effectuée 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 un temps d'analyse 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 effectué, tous sujets et conditions confondus. De plus, cette durée a été sectionnée en 3 blocs (15 minutes chaque) afin d'observer l'évolution des différentes variables. Ce choix a été fait considérant que les MCP peuvent présenter 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 négliger des différences significatives entre les conditions. Finalement, puisque les sujets sont comparés à eux même 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 allons analyser l'augmentation de la température cutanée entre le temps 0 et le temps 1.

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 petit que 0,05 sera utilisée lors de cette analyse.

CHAPITRE V

RÉSULTATS

La section suivante s'adressera à la présentation des résultats recueillis durant les différentes conditions testées lors de cette étude. L'analyse a été effectuée en deux temps soit : une analyse des données selon la méthode d'essai normalisée de l'ASTM F2300-10 (durée d'exposition variable selon les sujets), puis une analyse des données en considérant une base de temps uniforme. Le tableau 5.1 fournit une synthèse par sujets de la durée d'exposition pour chaque condition et la nature de l'arrêt. Le tableau 5.2 quant à lui fournit une synthèse des charges de travail externe associées à chacune des conditions. Malheureusement, dû à certains problèmes techniques durant la collecte des données, le sujet PO-P04 a dû être exclu de l'analyse des résultats.

Tableau 5.1 Durées d'exposition et critères d'arrêts (T_{int} : température interne, FC : fréquence cardiaque, Volontaire (S) sujet ou (E) expérimentateur) pour chacun des sujets selon la condition

Sujets	Condition Standard		Condition MCP		Condition Contrôle	
	Durée (minutes)	Critère d'arrêt	Durée (minutes)	Critère d'arrêt	Durée (minutes)	Critère d'arrêt
PO-P01	66	$T_{int} > 39^{\circ}\text{C}$	74	$T_{int} > 39^{\circ}\text{C}$	63	$T_{int} > 39^{\circ}\text{C}$
PO-P02	53	$T_{int} > 39^{\circ}\text{C}$	52.5	$\text{FC} > 85\%_{\text{omax}}$	58	$T_{int} > 39^{\circ}\text{C}$
PO-P03	75	$T_{int} > 39^{\circ}\text{C}$	90	$T_{int} > 39^{\circ}\text{C}$	70	$T_{int} > 39^{\circ}\text{C}$
PO-P05	61	$T_{int} > 39^{\circ}\text{C}$	76	$T_{int} > 39^{\circ}\text{C}$	55	$\text{FC} > 85\%_{\text{omax}}$
PO-P06	48	Volontaire S	48	$T_{int} > 39^{\circ}\text{C}$	46	$T_{int} > 39^{\circ}\text{C}$
PO-P07	64	Volontaire S	55	Volontaire S	50	Volontaire S
PO-P08	46	Volontaire E	47	Volontaire E	49	Volontaire E

Tableau 5.2 Charge de travail externe (Charge) en fonction de la vitesse (Vitesse) et de l'inclinaison (Pente) du tapis roulant pour chacun des sujets selon la condition

Sujets	Vitesse (km/h)	Condition Standard		Condition MCP		Condition Contrôle	
		Pente (%)	Charge (W)	Pente (%)	Charge (W)	Pente (%)	Charge (W)
PO-P01	5.5	1.4	263	1.4	263	1.4	263
PO-P02	5.5	1.5	258	1.5	258	1.5	258
PO-P03	5.5	1.4	255	1.4	255	1.4	255
PO-P05	5.5	1.7	253	1.7	253	1.7	253
PO-P06	5.5	1.5	252	1.5	252	1.5	252
PO-P07	5.5	1.3	250	1.3	250	1.3	250
PO-P08	5.5	1.5	254	1.5	254	1.5	254

5.1 Analyse selon la méthode d'essai normalisée ASTM F2300-10

5.1.1 Température ambiante et humidité relative

Le contrôle de l'environnement était un aspect primordial à considérer lors de l'étude, c'est pourquoi la première analyse effectuée porte sur l'ambiance thermique des conditions, soit la température ambiante et l'humidité relative à l'intérieur de la chambre climatique. La figure 5.1 présente les valeurs de température ambiante ainsi que les intervalles de confiance pour chacune des conditions évaluées. L'analyse de variance à mesure répétée pour la condition Standard (35.11 ± 0.23 °C), MCP (35.00 ± 0.26 °C) et Contrôle (34.98 ± 0.27 °C) n'a pas permis de déceler de différence significative pour le facteur condition ($p = 0.496$). La figure 5.2 présente les valeurs d'humidité relative ainsi que les intervalles de confiance pour chacune des conditions évaluées. L'analyse de variance à mesure répétée pour la condition Standard ($49.00 \pm$

0.76 %), MCP (49.13 ± 0.35 %) et Contrôle (49.50 ± 0.53 %) n'a pas permis de déceler de différence significative pour le facteur condition ($p = 0.289$). Ceci démontre que les 3 conditions ont été effectuées avec une température ambiante et une humidité relative comparable.

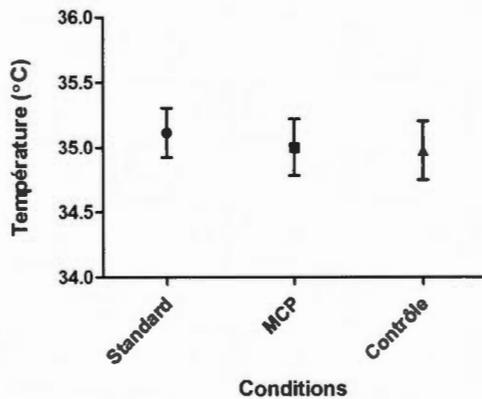


Figure 5.1 Températures ambiante moyennées selon les différentes conditions évaluées

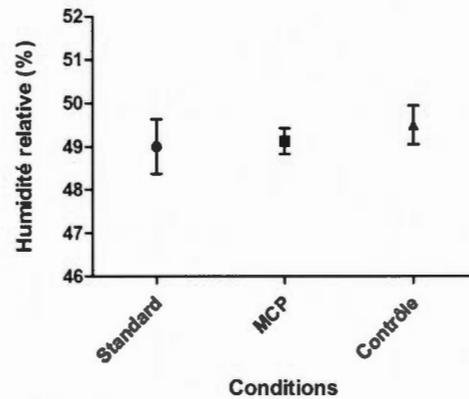


Figure 5.2 Pourcentages d'humidité relative moyennés selon les différentes conditions évaluées

5.1.2 Durée d'exposition

La seconde analyse effectuée présente les résultats de la durée d'exposition selon les différentes conditions évaluées. La figure 5.3 présente les valeurs de durée d'exposition moyennées des sujets ainsi que les intervalles de confiance, pour chacune des conditions évaluées. Bien que la moyenne de durée d'exposition des sujets ait été légèrement supérieure pour la condition MCP (63.21 ± 16.7 minutes) comparativement aux conditions Standard (59.0 ± 10.49 minutes) et Contrôle (55.93 ± 8.5 minutes), aucune différence significative n'a été décelée pour le facteur condition ($p = 0.123$)

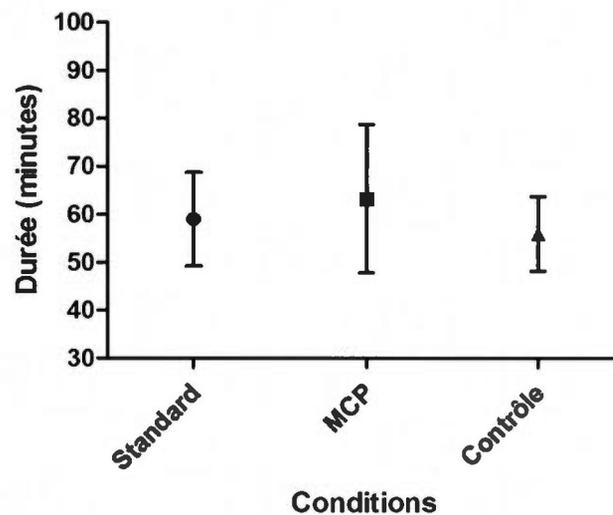


Figure 5.3 Durées d'exposition moyennées des sujets, selon les différentes conditions évaluées

5.1.3 Charge de travail externe

La troisième analyse effectuée présente les résultats de la charge de travail externe (CTE) imposé selon les différentes conditions évaluées. La figure 5.4 présente les valeurs de CTE des sujets moyennées ainsi que les intervalles de confiance, pour chacune des conditions évaluées. L'analyse de variance à mesure répétée pour la condition Standard (256.69 ± 7.12 W), MCP (254.99 ± 7.87 W) et Contrôle (254.41 ± 9.04 W) n'a pas permis de déceler de différence significative pour le facteur condition ($p = 0.562$). Ceci implique que les 3 conditions ont été effectuées avec une charge mécanique comparable.

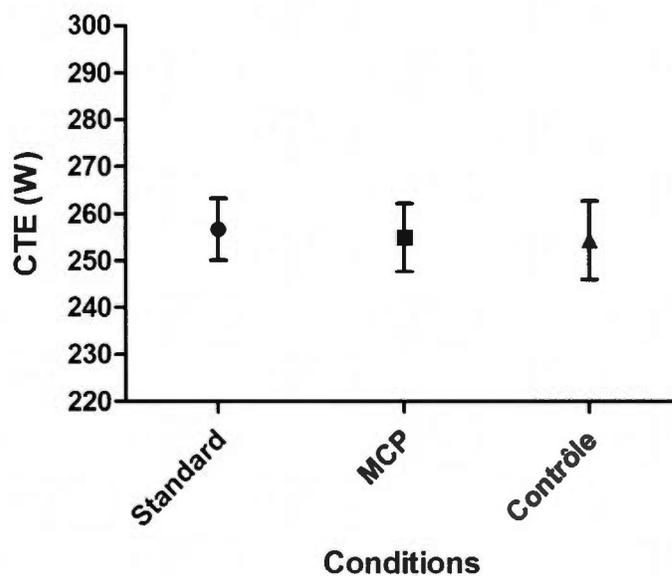


Figure 5.4 Charges de travail externe (CTE) moyennées des sujets, selon les différentes conditions évaluées

5.1.4 Consommation d'oxygène (VO_2)

La figure 5.5 présente l'évolution de la consommation d'oxygène pour les sept sujets selon la condition Standard. La consommation d'oxygène augmentait rapidement durant les 2 à 3 premières minutes, puis atteignait un plateau qui se maintenait jusqu'à la fin du test.

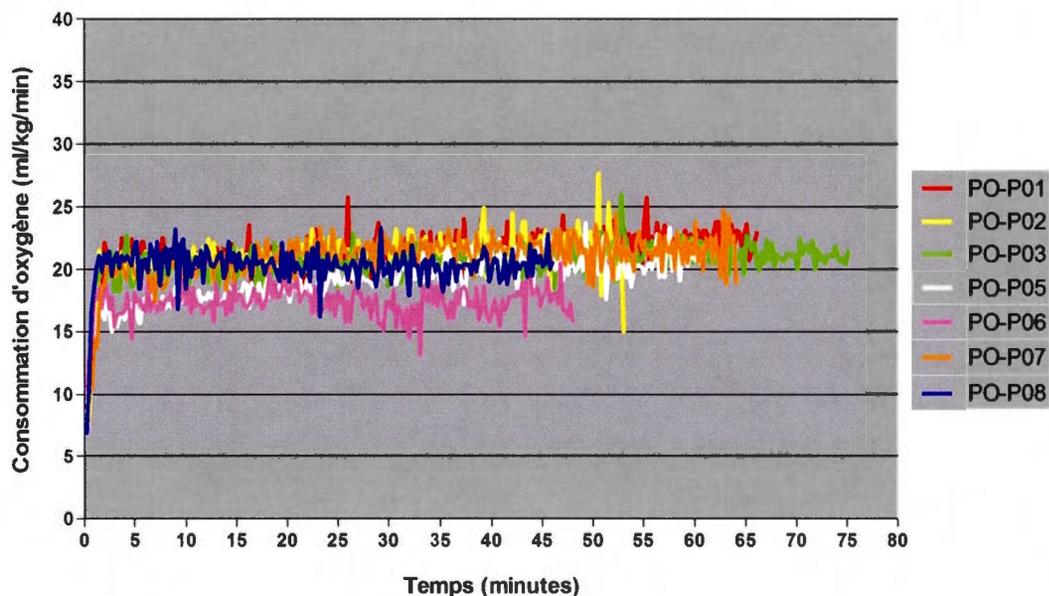


Figure 5.5 Représentation brute de la consommation d'oxygène pour les sept sujets pour la condition Standard

Puisque la durée d'exposition variait d'un sujet à l'autre, une analyse statistique de la mesure de la consommation d'oxygène finale selon la condition, tel que stipulé dans la méthode d'essai normalisée ASTM F2300-10, aurait été à l'encontre des considérations de base à respecter pour effectuer une ANOVA à mesure répétée (Atkinson G., 2001). Ainsi, une moyenne de la consommation d'oxygène de chaque condition a été effectuée.

En ce qui a trait aux variables subséquentes, elles ont été recalculées en fonction de leur variation dans le temps (VDT), aussi exprimé sous l'appellation « rate of change ». L'équation 5.1 présente le calcul permettant de transformer une variable en valeur comparable dans le temps, où 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.

Équation 5.1 : Variation dans le temps

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

Malheureusement, un problème technique avec le masque de l'appareil permettant de mesurer la consommation d'oxygène s'est produit et a faussé les valeurs recueillies d'un sujet. L'analyse a donc été restreinte à 6 sujets plutôt que 7. La figure 5.6 présente les valeurs moyennes de la consommation d'oxygène selon les différentes conditions évaluées. Il est à noter que les données de chaque sujet ont été analysées à partir de la 3^{ème} 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 mesure répétée pour la condition Standard (20.76 ± 0.77 ml/kg/min), MCP (20.12 ± 1.54 ml/kg/min) et Contrôle (21.13 ± 1.53 ml/kg/min) n'a pas permis de déceler de différence significative pour le facteur condition ($p = 0.167$). Ceci implique que les 3 conditions ont été effectuées avec une charge physiologique comparable.

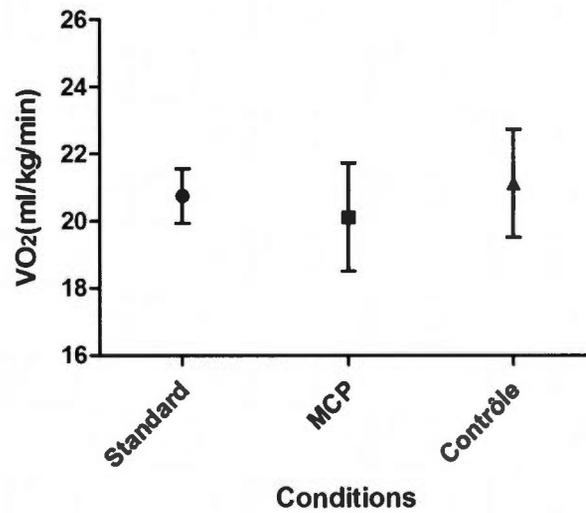


Figure 5.6 Moyennes de la consommation d'oxygène (ml/kg/min) par minute de 6 sujets, selon les différentes conditions évaluées

5.1.5 Fréquence cardiaque

La figure 5.7 présente, à titre d'exemple, le comportement de la FC des sept sujets pour la condition Standard. Selon ces résultats, la FC augmente de façon logarithmique dans les premières secondes du test et de façon beaucoup plus linéaire par la suite.

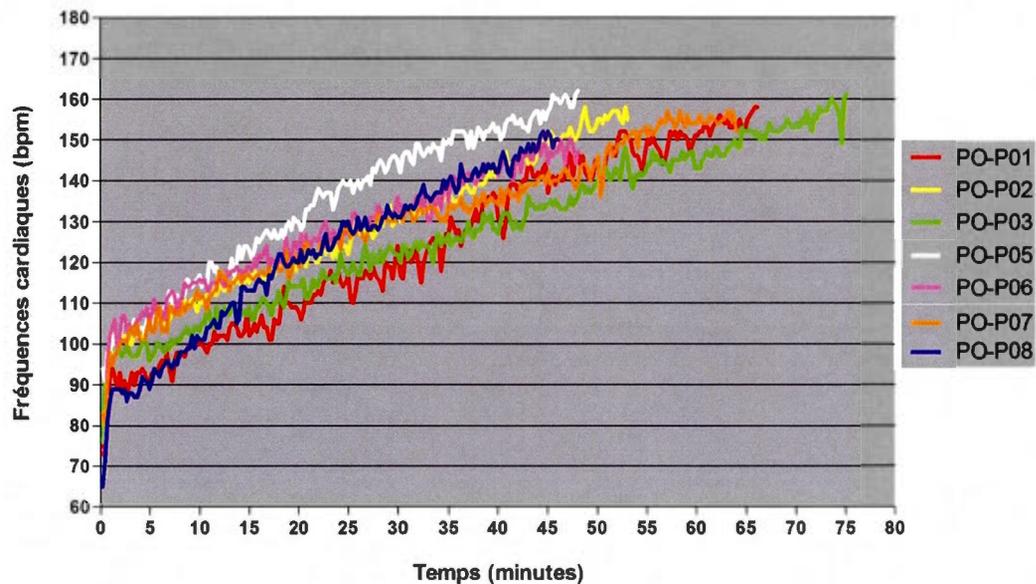


Figure 5.7 Représentation brute de la fréquence cardiaque pour les sept sujets pour la condition Standard

Afin de limiter les différences intra-individuelles liées au rythme basal, les données de fréquence cardiaque ont été analysées en terme de coût cardiaque relatif (CCR) qui tient compte de la fréquence de repos (FC_{repos}), de la fréquence maximale prédite du sujet (FC_{max}) et de la fréquence à laquelle l'activité est effectuée ($FC_{travail}$). L'équation 5.2 présente le calcul permettant de convertir les valeurs de fréquence cardiaque en coût cardiaque relatif.

Équation 5.2 : Coût Cardiaque Relatif

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

La figure 5.8 présente les valeurs de variation dans le temps du CCR moyennée des sujets, selon les différentes conditions évaluées. Il est à noter que les données de chaque sujet ont été analysées à partir de la 3^{ème} minute jusqu'à l'arrêt du test, afin d'éliminer la phase d'adaptation de la fréquence cardiaque à l'effort. L'analyse de

variance à mesure répétée pour la condition Standard (0.71 ± 0.12 %/min), MCP (0.68 ± 0.18 %/min) et Contrôle (0.74 ± 0.17 %/min) n'a pas permis de déceler de différence significative pour le facteur condition ($p = 0.468$).

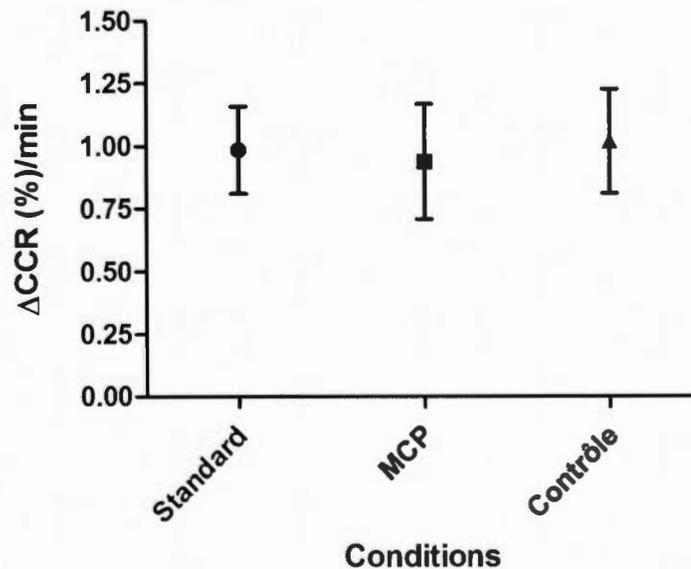


Figure 5.8 Moyennes de la variation du coût cardiaque relatif par minute des sujets, selon les différentes conditions évaluées

5.1.6 Température cutanée

La figure 5.9 présente, à titre d'exemple, les valeurs de température cutanée des sept sujets pour la condition Standard. Le comportement des différentes courbes démontre bien que la température cutanée augmente de manière brusque dans les 10 premières minutes du test, puis de manière plus linéaire par la suite.

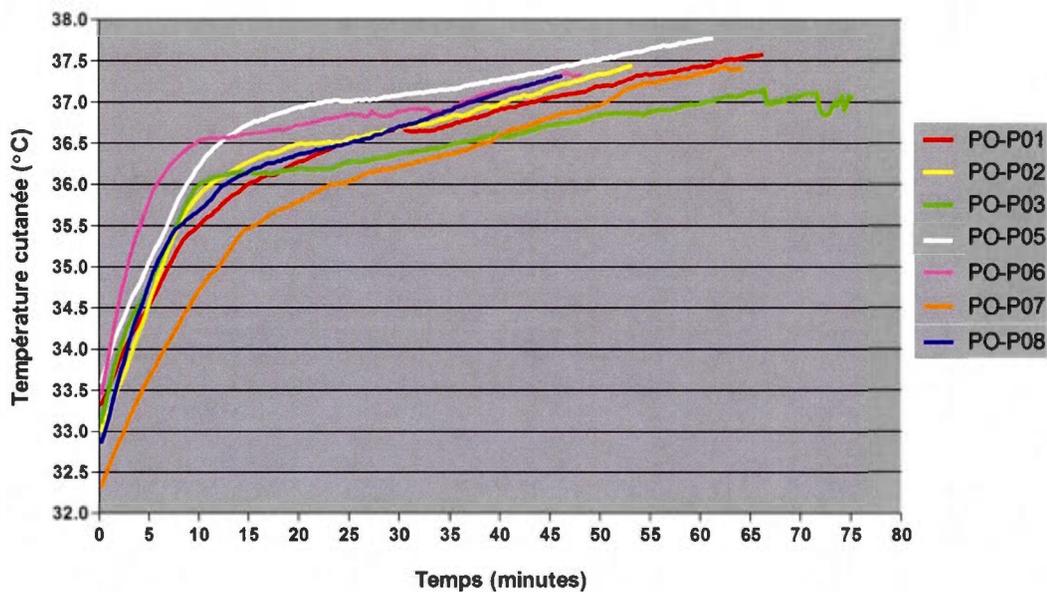


Figure 5.9 Représentation brute de la température cutanée pour les sept sujets pour la condition Standard

La figure 5.10 présente les valeurs de variation dans le temps de la température cutanée moyennée des sujets, selon les différentes conditions évaluées. L'analyse de variance à mesure répétée pour la condition Standard (0.075 ± 0.015 °C/min), MCP (0.067 ± 0.014 °C/min) et Contrôle (0.083 ± 0.009 °C/min) a démontré une différence significative pour le facteur condition ($p = 0.002$). Le tableau 5.3 présente l'analyse statistique de comparaison par paires 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.

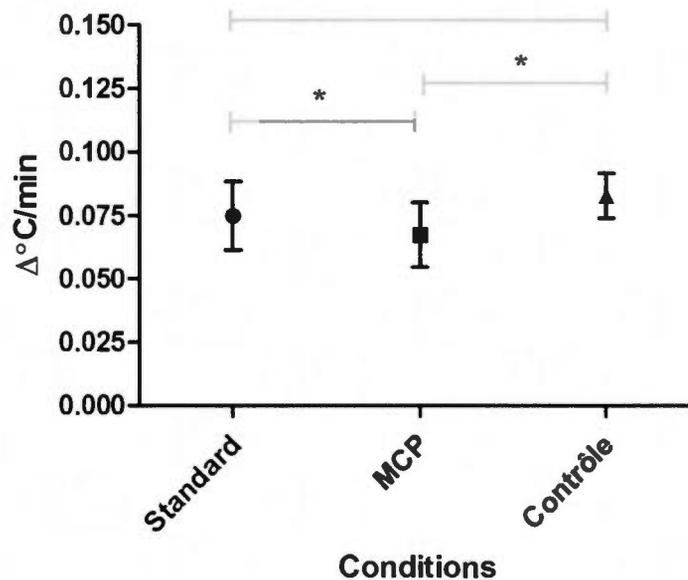


Figure 5.10 Moyennes de la variation de la température cutanée par minute des sujets, selon les différentes conditions évaluées (* $p < 0.05$)

Tableau 5.3 Résultats des analyses statistiques de comparaison par paires pour les valeurs de variation de la température cutanée selon les différentes conditions évaluées (* $p < 0.05$)

	Standard	MCP	Contrôle
Standard			
MCP	0.021*		
Contrôle	0.087	0.005*	

5.1.7 Température interne

La figure 5.11 présente comme exemple, les valeurs de température interne des sept sujets pour la condition Standard. Le comportement des différentes courbes démontre bien que la température interne augmente continuellement durant le test et que cette variable présente des différences interindividuelles importantes du début à la fin des mesures. L'écart-type moyen des sujets était de l'ordre de 0.37°C à la 45^{ème} minute des tests.

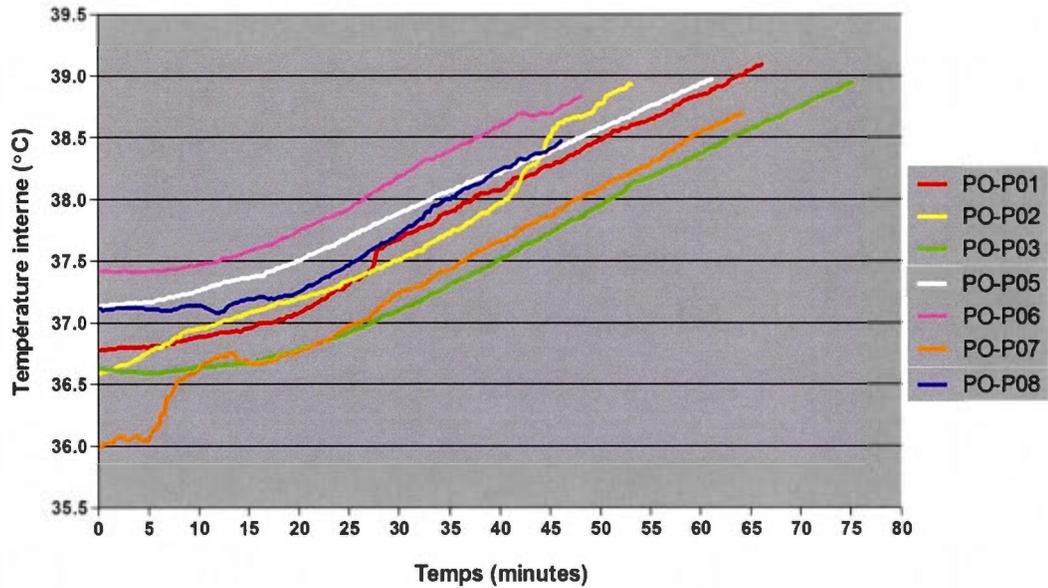


Figure 5.11 Représentation brute de la température interne pour les sept sujets pour la condition Standard

La figure 5.12 présente les valeurs de variation dans le temps de la température interne moyennée des sujets, selon les différentes conditions évaluées. L'analyse de variance à mesure répétée pour la condition Standard (0.034 ± 0.006 °C/min), MCP (0.032 ± 0.005 °C/min) et Contrôle (0.037 ± 0.005 °C/min) n'a pas permis de déceler de différence significative pour le facteur condition ($p = 0.191$).

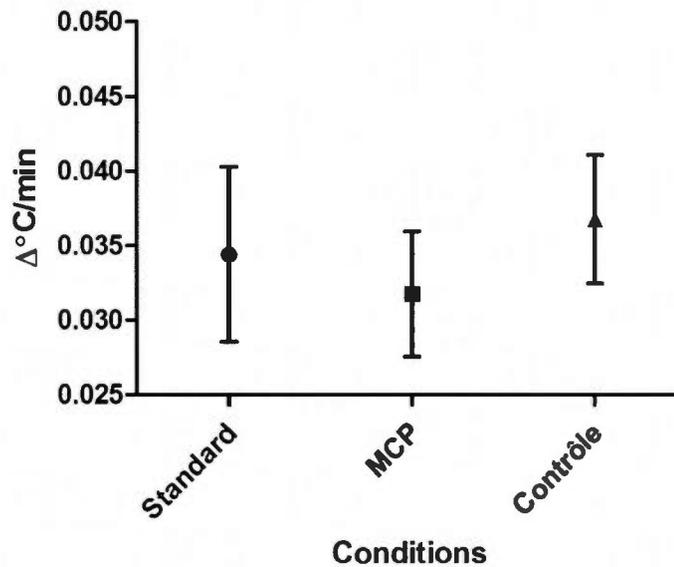


Figure 5.12 Moyennes de la variation de la température interne par minute des sujets, selon les différentes conditions évaluées

5.1.8 Perte hydrique

La perte hydrique mesurée à la fin du test a été ramenée à une valeur comparable en divisant la perte hydrique totale obtenue en grammes (poids du sujet initial moins poids du sujet final), par la durée d'exposition. La figure 5.13 présente les valeurs de variation dans le temps de la perte hydrique moyennée des sujets, selon les différentes conditions évaluées. L'analyse de variance à mesure répétée avec une correction Greenhouse-Geisser, pour la condition Standard (22.47 ± 3.71 g/min), MCP (23.45 ± 4.86 g/min) et Contrôle (24.95 ± 6.61 g/min) n'a pas permis de déceler de différence significative pour le facteur condition ($p = 0.404$)

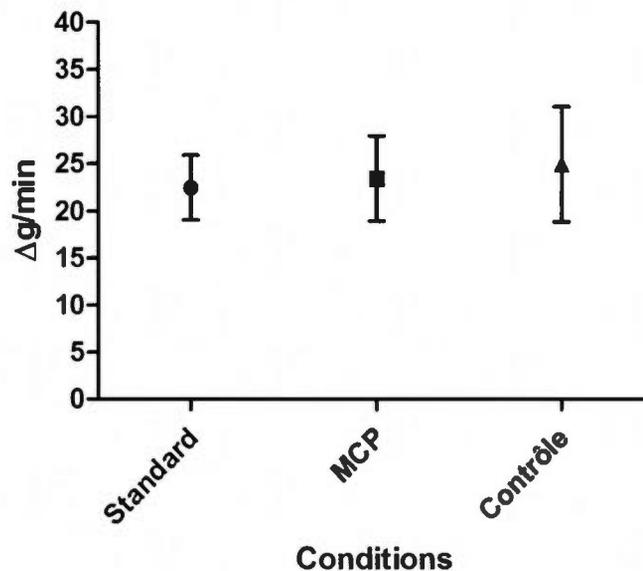


Figure 5.13 Moyennes de la variation de la perte hydrique par minute des sujets, selon les différentes conditions évaluées

5.1.9 Perception psychophysique

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. La figure 5.14 présente les valeurs de variation dans le temps de la perception de l'effort des sujets, selon les différentes conditions évaluées. L'analyse de variance à mesure répétée, pour la condition Standard (0.147 ± 0.062 Borg/min), MCP (0.151 ± 0.068 Borg/min) et Contrôle (0.164 ± 0.059 Borg/min) n'a pas permis de déceler de différence significative pour le facteur condition ($p = 0.198$). Toutefois, en enlevant l'ajustement des comparaisons multiples Bonferonni, la comparaison par paires des conditions Standard et contrôle a permis de déceler une différence significative ($p = 0.012$) entre ces deux conditions. Ceci semble indiquer un manque de puissance statistique en lien avec le nombre limité de sujets rattachés à cette étude. En effet, ayant un « n » trop

petit ($n = 7$), le modèle complet n'arrive pas à détecter un effet global significatif. Par contre, en comparant les conditions deux par deux, le modèle a assez de puissance pour détecter un effet significatif. Le tableau 5.4 présente l'analyse statistique de comparaison par paires de cette variable. Ces résultats semblent démontrer une augmentation plus rapide de la perception de l'effort pour la condition Contrôle comparativement à la condition Standard. Pour ce test, la comparaison des effets principaux s'est faite sans ajustement de l'intervalle de confiance (LSD (aucun)).

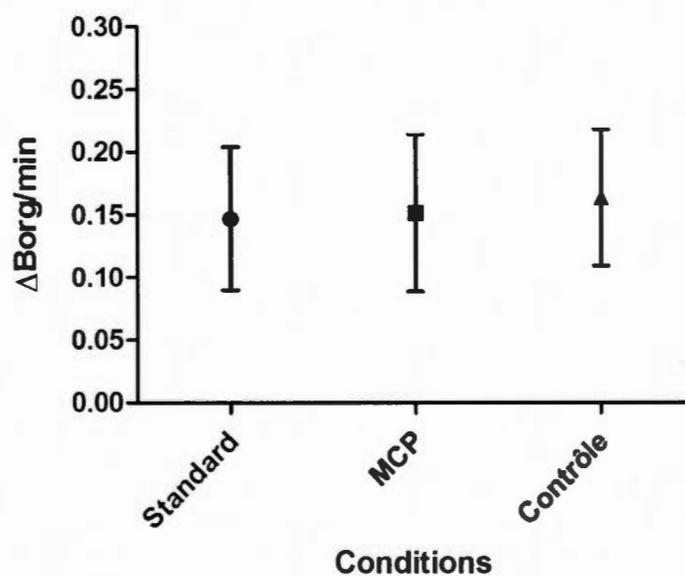


Figure 5.14 Moyennes de la variation de la perception de l'effort par minute des sujets, selon les différentes conditions évaluées

Tableau 5.4 Résultats des analyses statistiques de comparaison par paires pour les valeurs de variation de la perception de l'effort selon les différentes conditions évaluées (* $p < 0.05$)

	Standard	MCP	Contrôle
Standard			
MCP	0.667		
Contrôle	0.012*	0.308	

5.2 Analyse statistique sur base de temps uniforme

La prochaine section s'adressera à la présentation des résultats analysés sur une base de temps uniforme. Une durée de 45 minutes a été retenue, puisque cela correspond à la durée minimale ayant été effectuée, tous sujets et conditions confondues. Les données recueillies selon la condition (facteur condition=3) ont été analysées à 3 intervalles de temps égaux (facteur temps=3) soit : à 15 minutes, à 30 minutes et à 45 minutes. Cette analyse en fonction du temps permettrait de mieux faire ressortir des effets ou différences significatives qui pourraient avoir été atténués en analysant le bloc complet.

5.2.1 Consommation d'oxygène (VO_2)

La figure 5.15 présente l'évolution de la consommation d'oxygène moyennée des sujets selon les différentes conditions évaluées. Malheureusement, un problème technique avec le masque de l'appareil permettant de mesurer la consommation d'oxygène s'est produit et a faussé les valeurs recueillies d'un sujet. L'analyse a donc été restreinte à 6 sujets plutôt que 7. La consommation d'oxygène augmentait rapidement durant les 2 à 3 premières minutes, puis atteignait un plateau qui se maintenait jusqu'à la fin du test.

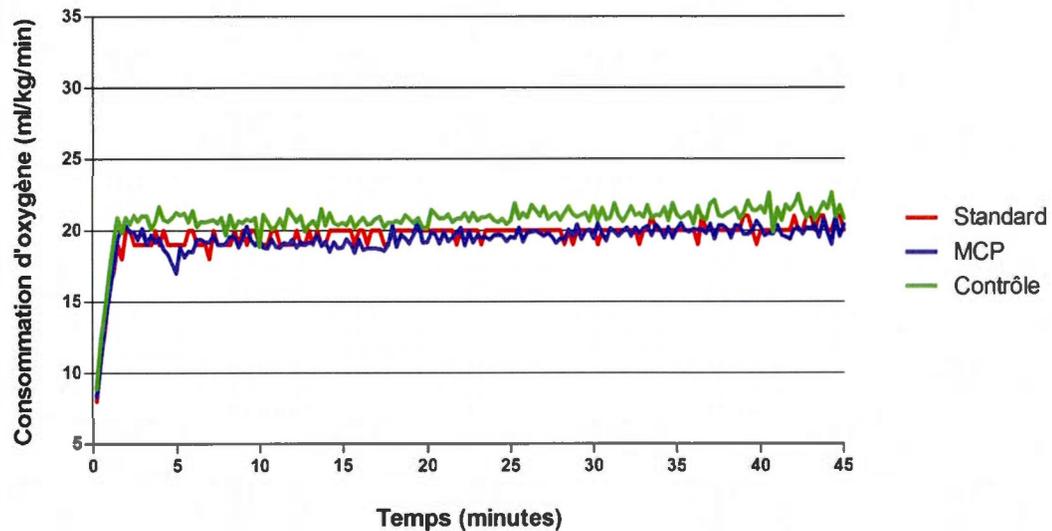


Figure 5.15 Représentation brute de la consommation d'oxygène moyennée de 6 sujets pour les trois conditions évaluées

La figure 5.16 présente les valeurs de la variation de la consommation d'oxygène moyennées des sujets selon la condition évaluée et le temps. Il est à noter que les données de chaque sujet ont été analysées à partir de la 3^{ème} minute afin d'éliminer la phase d'adaptation de la consommation d'oxygène à l'effort. L'analyse de variance à mesure répétée pour la condition Standard, MCP et Contrôle n'a pas permis de déceler de différence significative pour le facteur condition ($p = 0.372$), le facteur temps ($p = 0.123$) et la combinaison des facteurs condition*temps ($p = 0.549$). Cette analyse démontre que les 3 conditions ont été effectuées avec une charge musculaire physiologique comparable.

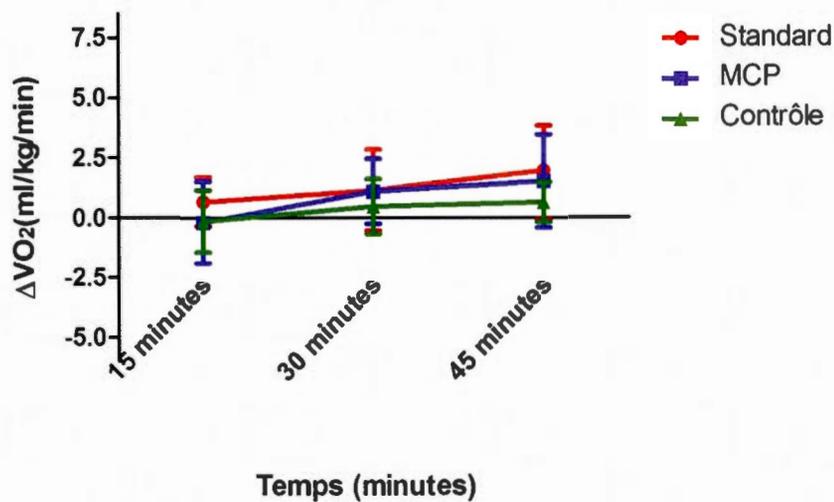


Figure 5.16 Moyennes de la variation de la consommation d'oxygène selon la condition évaluée et le temps

5.2.2 Fréquence cardiaque

La figure 5.17 présente l'évolution de la fréquence cardiaque moyennée des sujets selon les différentes conditions évaluées. Selon ces résultats, la FC augmente de façon logarithmique dans les premières secondes du test et de façon beaucoup plus linéaire par la suite

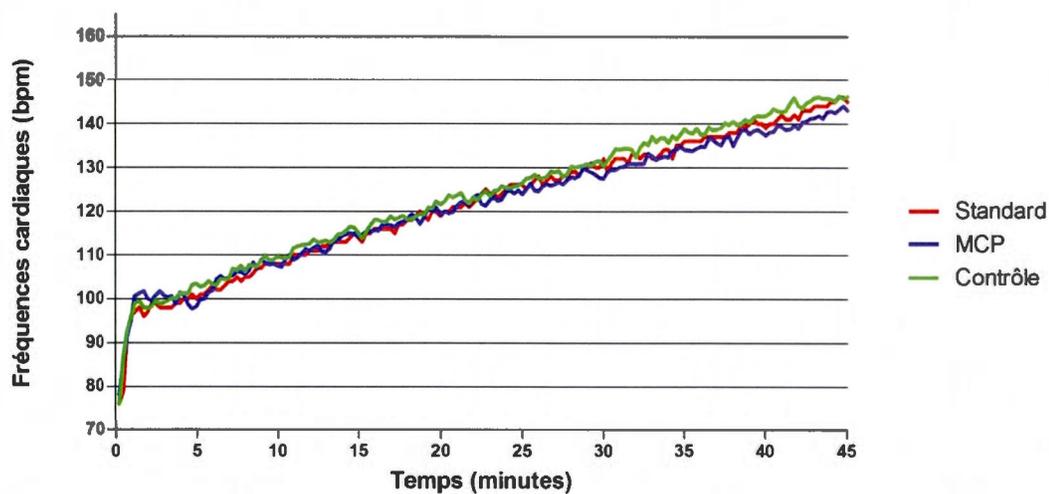


Figure 5.17 Représentation brute de la fréquence cardiaque moyennée des sujets pour les trois conditions évaluées

La figure 5.18 présente les valeurs de la variation du CCR moyennées des sujets, selon la condition évaluée et le temps. Il est à noter que les données de chaque sujet ont été analysées à partir de la 3^{ème} minute afin d'éliminer la phase d'adaptation de la fréquence cardiaque à l'effort. Malgré une tendance visible, l'analyse de variance à mesure répétée pour la condition Standard, MCP et Contrôle n'a pas permis de déceler de différence significative pour le facteur condition ($p = 0.254$) et condition*temps ($p = 0.311$). Toutefois, une différence significative a été observée pour le facteur temps ($p = 0.000$). Le tableau 5.5 présente l'analyse statistique de comparaison par paires de cette variable selon le facteur temps. Ces résultats semblent démontrer une augmentation du coût cardiaque relatif dans le temps, toutes conditions confondues. Pour ce test, la comparaison des effets principaux s'est faite sans ajustement de l'intervalle de confiance (LSD (aucun)).

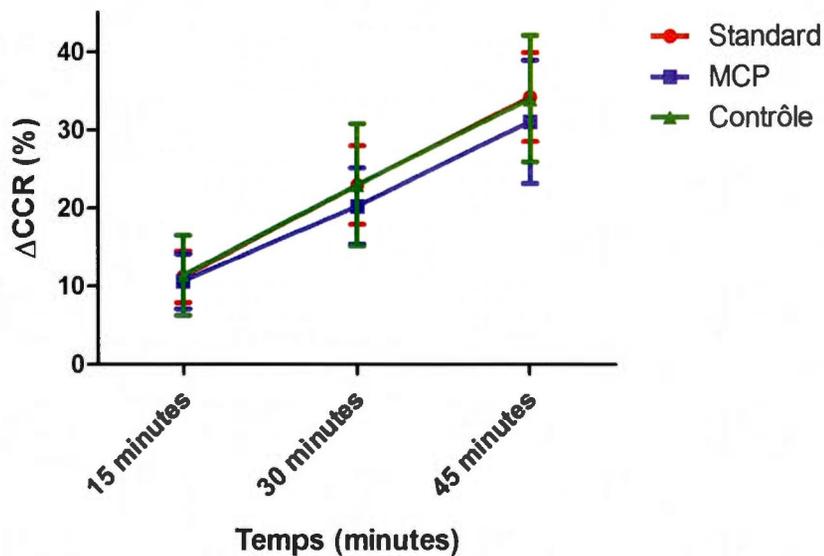


Figure 5.18 Moyennes de la variation du coût cardiaque relatif selon la condition évaluée et le temps

Tableau 5.5 Résultats des analyses statistiques de comparaison par paires pour les valeurs de coût cardiaque relatif selon le facteur temps (* $p < 0.05$)

	15 minutes	30 minutes	45 minutes
15 minutes			
30 minutes	0.000*		
45 minutes	0.000*	0.000*	

5.2.3 Température cutanée

La figure 5.19 présente la variation de la température cutanée moyennée des sujets selon les différentes conditions évaluées. Le comportement des différentes courbes démontre bien que la température cutanée augmente de manière brusque dans les premières 10 minutes du test, puis de manière plus linéaire par la suite. Les courbes semblent illustrer que la température cutanée des sujets pour la condition MCP a été plus basse comparativement aux conditions standard et contrôle.

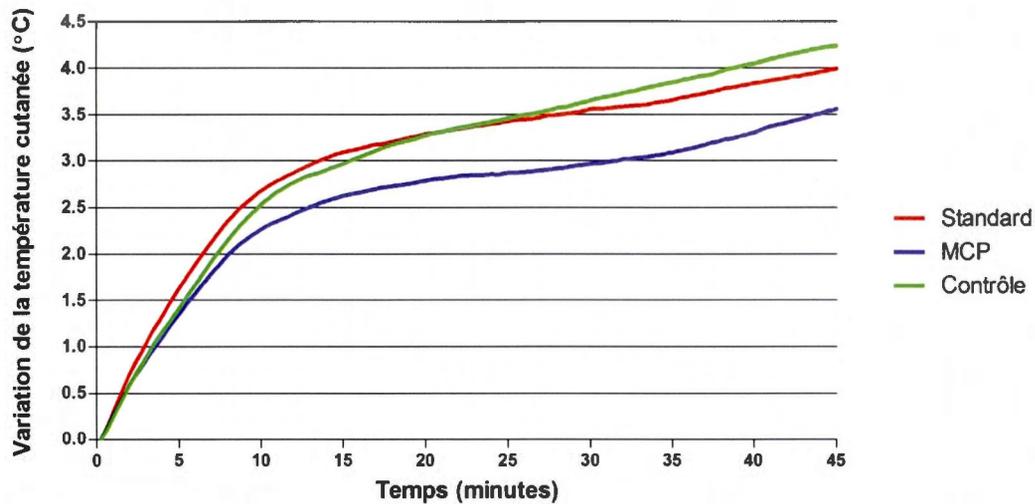


Figure 5.19 Représentation de la variation de la température cutanée moyennée des sujets pour les trois conditions évaluées

La figure 5.20 présente les valeurs de la variation de la température cutanée moyennées des sujets selon la condition évaluée et le temps. L'analyse de variance à mesure répétée pour la condition Standard, MCP et Contrôle a permis de déceler une différence significative pour le facteur condition ($p = 0.012$), le facteur temps ($p = 0.000$) et la combinaison des facteurs condition*temps ($p = 0.019$). L'analyse de ce dernier facteur a été corrigée par l'épsilon Greenhouse-Geiser. Le tableau 5.6 présente l'analyse statistique de comparaison par paires de cette variable selon le facteur condition. Ces résultats semblent démontrer une augmentation moins importante de la température cutanée pour la condition MCP comparativement aux conditions Standard et Contrôle. Le tableau 5.7 présente l'analyse statistique de comparaison par paires de cette variable selon le facteur temps. Ces résultats semblent démontrer une augmentation de la température cutanée dans le temps, toutes conditions confondues. Pour ce test, la comparaison des effets principaux s'est faite sans ajustement de l'intervalle de confiance (LSD (aucun)).

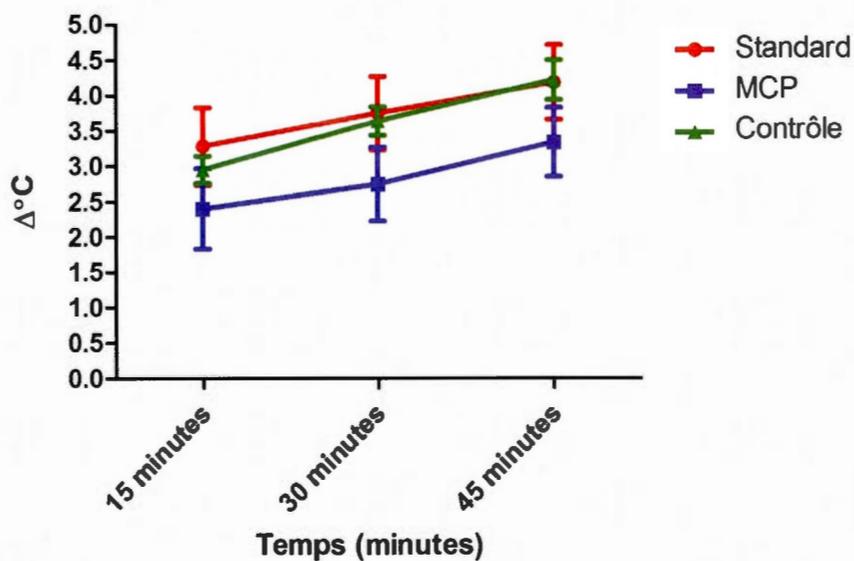


Figure 5.20 Moyennes de la variation de la température cutanée selon la condition évaluée et le temps

Tableau 5.6 Résultats des analyses statistiques de comparaison par paires pour les valeurs de température cutanée selon le facteur condition (* $p < 0.05$)

	Standard	MCP	Contrôle
Standard			
MCP	0.036*		
Contrôle	0.631	0.005*	

Tableau 5.7 Résultats des analyses statistiques de comparaison par paires pour les valeurs de température cutanée selon le facteur temps (* $p < 0.05$)

	15 minutes	30 minutes	45 minutes
15 minutes			
30 minutes	0.000*		
45 minutes	0.000*	0.000*	

5.2.4 Température interne

La figure 5.21 présente la variation de la température interne moyennée des sujets selon les différentes conditions évaluées. Les courbes semblent démontrer que la température interne augmente progressivement tout au long du test.

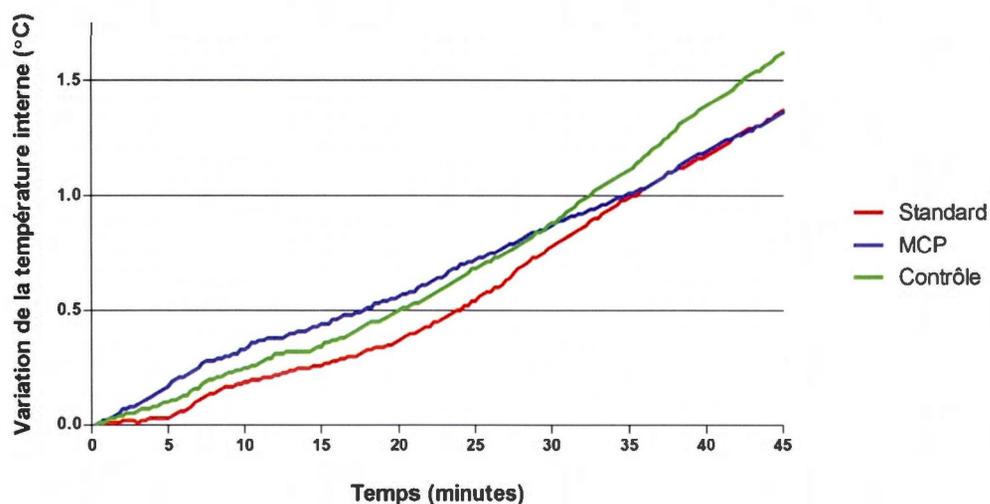


Figure 5.21 Représentation de la variation de la température interne moyennée des sujets pour les trois conditions évaluées

La figure 5.22 présente les valeurs de la variation de la température interne moyennées des sujets selon la condition évaluée et le temps. L'analyse de variance à mesure répétée pour la condition Standard, MCP et Contrôle n'a pas permis de déceler 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 la combinaison des facteurs condition*temps ($p = 0.000$). Le tableau 5.8 présente l'analyse statistique de comparaison par paires de cette variable pour le facteur temps. Ces résultats semblent démontrer une augmentation de la température interne dans le temps, toutes conditions confondues. Pour ce test, la comparaison des effets principaux s'est faite sans ajustement de l'intervalle de confiance (LSD (aucun)).

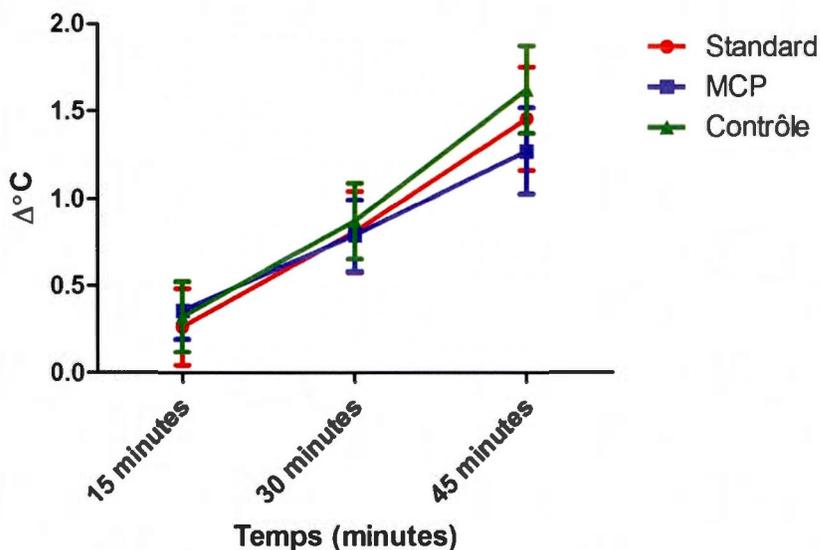


Figure 5.22 Moyennes de la variation de la température interne selon la condition évaluée et le temps

Tableau 5.8 Résultats des analyses statistiques de comparaison par paires pour les valeurs de température interne selon le facteur temps (* $p < 0.05$)

	15 minutes	30 minutes	45 minutes
15 minutes			
30 minutes	0.000*		
45 minutes	0.000*	0.000*	

La différence significative obtenue pour la combinaison des facteurs condition*temps implique que la température interne n'augmente pas de la même manière selon la condition. À la figure 5.23 les valeurs d'augmentation de la température interne ont été analysées par intervalle de temps afin de faire ressortir la trajectoire dans le temps de chacune des conditions. 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 la condition 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 implique 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 conditions. Les tableaux 5.9 à 5.11 présentent l'analyse statistique de comparaison par paires de cette variable pour le facteur `intervalle_temps` selon chacune des conditions. Pour ces tests, la comparaison des effets principaux s'est faite sans ajustement de l'intervalle de confiance (LSD (aucun))

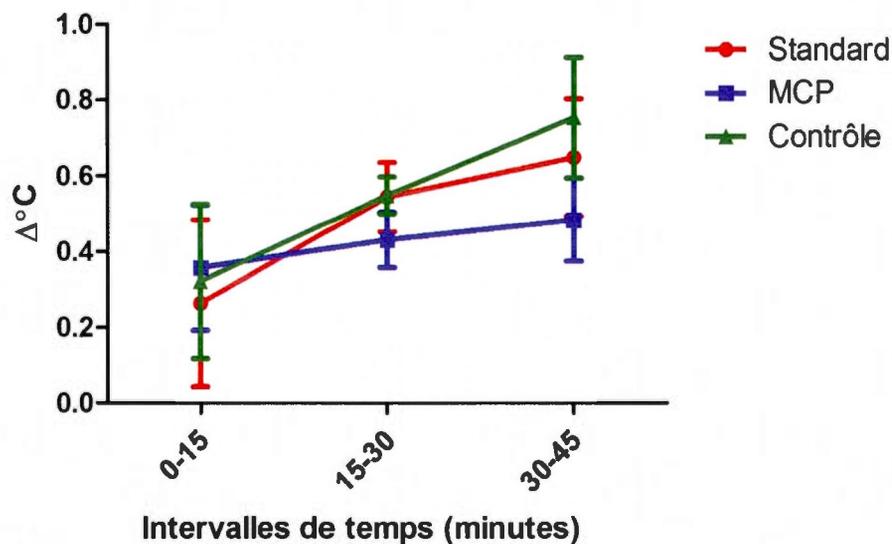


Figure 5.23 Moyennes de la variation de la température interne selon la condition évaluée et l'intervalle de temps

Tableau 5.9 Résultats des analyses statistiques de comparaison par paires pour les valeurs d'augmentation de température interne selon le facteur `intervalle_temps` pour la condition standard (* $p < 0.05$)

	0-15	15-30	30-45
0-15			
15-30	0.032*		
30-45	0.005*	0.285	

Tableau 5.10 Résultats des analyses statistiques de comparaison par paires pour les valeurs d'augmentation de température interne selon le facteur interval_temps pour la condition MCP (*p<0.05)

	0-15	15-30	30-45
0-15			
15-30	0.287		
30-45	0.178	0.204	

Tableau 5.11 Résultats des analyses statistiques de comparaison par paires pour les valeurs d'augmentation de température interne selon le facteur interval_temps pour la condition contrôle (*p<0.05)

	0-15	15-30	30-45
0-15			
15-30	0.031*		
30-45	0.007*	0.032*	

CHAPITRE VI

DISCUSSION

L'objectif de cette étude était d'évaluer l'efficacité d'un système d'absorption de la chaleur composé de matériau à changement de phase (MCP) intégré au vêtements individuels de protection que portent les pompiers. Pour atteindre cet objectif, huit sujets (7 analysés) ont effectué 3 conditions expérimentales (Standard, MCP et Contrôle) afin de mesurer et comparer les différents paramètres physiologiques d'une condition à l'autre. Parmi ceux-ci, notons : la fréquence cardiaque, la consommation d'oxygène, la température cutanée, la température interne, la perte hydrique. Des mesures telles que la durée d'exposition et la perception psychophysique de l'effort étaient également recueillies afin d'évaluer l'efficacité et le confort du VIP chez le pompier.

6.1 Le matériau à changement de phase

Préalablement à l'étude, certaines hypothèses avaient été formulées quant aux effets que pourrait apporter le port de matériau à changement de phase (MCP) dans les vêtements individuels de protection (VIP) du pompier. Puisque le matériau est conçu de manière à absorber une partie de la chaleur dégagée par le corps du pompier, les variables qui étaient identifiées comme les plus propices à être influencées étaient : la température cutanée, la fréquence cardiaque et la température interne. Dans une moindre mesure, en diminuant la chaleur accumulée dans le VIP il aurait été envisageable d'observer une perception de l'effort moins élevée, une durée d'exposition accrue, ainsi qu'une perte hydrique moins importante. Ces hypothèses

ont pu être établies en considérant les contraintes et les astreintes physiques et physiologiques auxquelles sont soumis les pompiers lors de leur travail (Davis et Santa Maria, 1975; Lemon et Hermiston, 1977; Duncan, Gardner et Barnard, 1979; Davis, Dotson et Santa Maria, 1981; Skoldstrom, 1987; Faff et coll., 1989; Ftaiti et coll., 2001; Griefahn et coll., 2003).

Les résultats de la figure 5.10 démontrent que la condition MCP a engendré la plus faible augmentation de la température cutanée dans le temps avec une valeur de $0.067^{\circ}\text{C}/\text{minute}$ comparativement à $0.075^{\circ}\text{C}/\text{minute}$ pour la condition Standard et $0.083^{\circ}\text{C}/\text{minute}$ pour la condition Contrôle. Considérant qu'une température cutanée qui atteint 38°C représente une réponse limite (Christensen, 1953; Tattersall et Thomas, 1985) et considérant une température cutanée initiale moyenne de 33.05°C chez l'ensemble des sujets, il est possible d'estimer que le port du VIP contenant les MCP a permis de retarder l'atteinte de la réponse limite de la température cutanée de 8 minutes par rapport à la condition Standard et de 14 minutes par rapport à la condition Contrôle.

En observant les résultats des analyses sur base de temps uniforme, il est possible d'observer 2 phases distinctes d'adaptation de la température cutanée, visible sur la figure 5.19. Premièrement, une phase d'adaptation rapide en lien avec le passage d'une température ambiante située entre 22 et 23°C , à un ambiance chaude contrôlée à 35°C (combiné à un effort physique modéré). Cette phase dure entre 10 et 15 minutes selon la condition. Par la suite une adaptation plus lente, en lien avec l'accumulation de chaleur se produisant à l'intérieur du VIP et la vasodilatation périphérique, se poursuivant jusqu'à complétion du test.

La figure 5.20 démontre que, déjà à partir de 15 minutes du début du test, la condition MCP permet une augmentation moins importante de la température cutanée que les deux autres conditions. C'est lors de ce premier 15 minutes que la condition MCP

gagne son avantage par rapport aux autres conditions; phénomène qui s'accroît à la 30^{ème} minute, principalement entre la condition MCP et Contrôle. À la 45^{ème} minute, on observe une différence significative ($p = 0.006$) entre les valeurs moyennes d'augmentation de la température cutanée de la condition Standard (4.198°C) et Contrôle (4.235°C) et celles de la condition MCP (3.351°C). Ces observations semblent suggérer que les MCP ont un effet refroidissant limité et principalement efficace lors des premières minutes d'utilisation. Toutefois, bien que limité, cet effet semble être bénéfique à long terme puisque, tel qu'observé à la figure 5.20, l'écart de température acquis dans les 15 premières minutes entre la condition MCP et les deux autres conditions se maintient. 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 reste le lien entre la température cutanée et la température interne lors d'une interaction avec une ambiance thermique chaude. Bien que les mécanismes physiologiques associés à ces événements (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, des chercheurs se sont attardés à cette problématique et ont quantifié le temps nécessaire avant une modification significative de la température interne lors de l'augmentation progressive de la température ambiante. Selon cette étude (Iwase et coll., 2002), une inhibition significative de l'activité sympathique vasoconstrictrice se produit en moyenne 7.7 minutes suivant l'augmentation de la température ambiante. Au niveau de la température interne, on observe une légère augmentation de température en pic, après 8.2 minutes suivi d'une baisse significative de la température interne 14 minutes

suivant l'augmentation de la température ambiante. Cette baisse est attribuable au flot sanguin périphérique accru. Un autre élément important ressortant de la présente étude démontre que dans une situation où la température de la peau augmenterait et que la température centrale du sang diminuerait (par exemple, dans le cas d'une application locale de chaleur alors que le sujet est dans un environnement froid), les réflexes évoqués par les récepteurs de température cutanée prédominent sur ceux évoqués par les récepteurs hypothalamiques. Ce phénomène pourrait venir expliquer les résultats obtenus à la figure 5.23 qui tendent à démontrer que durant les 15 premières minutes du test, la température interne a augmenté plus rapidement dans le temps pour la condition MCP que la condition Standard et Contrôle. Bien que cette tendance ne soit pas significative, en restreignant notre analyse aux 5 premières minutes de la condition, nous avons obtenu une différence significative entre l'augmentation de la température interne pour la condition MCP comparativement à la condition Standard et Contrôle. Il est à noter que la veste contenant les MCP a été installée sur le sujet un maximum de 5 minutes avant le début de la condition qui correspond au temps zéro sur l'ensemble des figures. Ainsi, nous pourrions émettre l'hypothèse que le port de la veste a entraîné, dans les premières minutes, une réaction cutanée vasoconstrictive qui a eu pour effet d'augmenter la température interne plus rapidement pour cette condition lors des 15 minutes suivant la fin de l'instrumentation du sujet. Encore une fois, 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., 2011; Gao et coll., 2011). En se référant au tableau 5.9, il est possible d'observer que la valeur d'augmentation de la température interne au bloc 0 à 15 minutes pour la condition MCP n'est pas significativement différente des deux autres blocs de temps. Autrement dit, l'augmentation de 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 au bloc de temps 15-30 minutes et 30-45 minutes, tel qu'observé dans les tableaux 5.8 et 5.10. Ceci implique une augmentation de la température interne qui s'accélère avec la durée d'exposition. Considérant que sur 24 conditions, la moitié des arrêts ont été causés par une température interne trop élevée, ces résultats démontrent l'importance d'un matériau, en l'occurrence les MCP, qui permettent de ralentir l'augmentation de la température interne en absorbant la chaleur produite par le sujet.

Contrairement à notre hypothèse de départ, la fréquence cardiaque n'a pas démontré de différence significative d'une condition à l'autre et ce, malgré une différence significative de la température cutanée. Bien qu'une tendance observable à la figure 5.18 semble démontrer que la condition MCP permettrait une augmentation moins importante du CCR, il est possible que l'effet de refroidissement perçu au niveau de la température cutané n'ait pas été assez significatif pour engendrer une baisse de l'effet thermorégulateur de la fréquence cardiaque.

Malgré tout, bien que la contrainte de chaleur a eu un impact important sur l'augmentation de la fréquence cardiaque des sujets durant les conditions, cette variable ne s'est pas avérée limitante pour les différentes conditions. En effet, à seulement 2 occasions sur 24 conditions, l'expérimentation a dû être arrêtée à cause d'une fréquence cardiaque trop élevée chez le sujet. Tel que mentionné, le principal critère d'arrêt s'est avéré être la température interne avec 12 arrêts sur 24 conditions, les autres arrêts (10) ayant été volontaires soit déterminés par l'expérimentateur (risque à la santé du sujet), ou le sujet lui-même (perception de l'effort ou inconfort trop important).

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 comparativement aux conditions Standard (59.00 minutes) et Contrôle (55.93 minutes).

Aucune différence significative n'a été trouvée au niveau de la perte hydrique en comparant les différentes conditions.

La seule différence significative ayant été trouvée au niveau de la perception psychophysique de l'effort se trouve entre la condition Standard et Contrôle. Les résultats démontrent que la cote subjective accordée à l'effort augmentait plus rapidement pour la condition Contrôle (0.164 Borg/min) que Standard (0.147 Borg/min).

Les résultats observés pour cette étude semblent concorder avec ceux d'études antérieures (Carter et coll., 2006; Gao et coll., 2007; Chou et coll., 2008; Gao et coll., 2011) 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 peu d'influence sur les autres paramètres physiologiques importants tels que la fréquence cardiaque et la température interne. Tel qu'observé dans la présente étude, les travaux nommés précédemment ont observé une différence significative de l'augmentation de la température interne dans le temps pour les MCP qui était moindre (condition*temps $p < 0.05$), sans toutefois engendrer une différence significative au niveau du facteur condition.

CHAPITRE VII

CONCLUSION

L'objectif 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 aux vêtements de pompier et de documenter ces effets sur les différents ajustements physiologiques associés au travail en ambiance chaude. Tel que présenté dans les résultats et la discussion, les effets ont été significatifs au niveau de la température cutanée qui était inférieure pour la condition MCP ainsi que pour l'augmentation de la température interne qui progressait moins rapidement que les deux autres conditions. 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 donner d'avantages à la condition MCP concernant le confort ressenti.

Toutefois, même si les différences entre les conditions semblent assez minces, les résultats des tests laissent présager qu'une amélioration du prototype de la veste et de la disposition des MCP pourrait permettre de mieux faire ressortir certains effets notamment au niveau de la température interne et de la fréquence cardiaque. La conception du prototype de veste pour la phase 2 devrait permettre un meilleur contact du MCP avec la peau du sujet en utilisant une substance élastique qui épouserait les formes du corps et en éliminant l'interface du chandail entre la substance refroidissante et la peau; par exemple en créant une veste souple et confortable qui servirait de sous-vêtement et permettrait de contenir le MCP. L'ajout de pochettes additionnelles notamment aux flancs, qui représente un endroit de

grande perte de chaleur chez l'humain, pourrait également améliorer la performance de ce système de thermorégulation.

Les résultats de cette étude démontrent que la recherche et développement de nouveaux matériaux permettant de réduire la contrainte thermique pour le métier de pompier devrait représenter une préoccupation majeure puisque ces derniers peuvent potentiellement améliorer l'efficacité de la thermorégulation lors du travail en ambiance chaude. L'emplacement, la quantité, le poids et le point de fusion de ces matériaux sont tous des éléments critiques à considérer lors du développement de prototype de veste refroidissante à base de MCP.

ANNEXE A

FORMULAIRE DE PRÉSÉLECTION



FORMULAIRE D'INFORMATION ET DE CONSENTEMENT DU
PARTICIPANT MAJEUR

Présélection pour le projet intitulé «Évaluation de la réponse physiologique au port de vêtements individuels de protection (VIP) : application à de nouvelles technologies pour les habits de pompiers (Phase 1 et phase 2)»

Identification :

Responsables du projet	Denis Marchand, Professeur-Chercheur au département de kinanthropologie, UQAM
	Chantal Gauvin, Chercheur à l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et sécurité au travail
	Mylène Aubertin-Leheudre, Professeur-Chercheur au département de kinanthropologie, UQAM
Département, centre ou institut	Université du Québec à Montréal, Département de Kinanthropologie
Adresse postale	UQAM C.P. 8888, Succursale Centre ville, Montréal, Québec, H3C 3P8.
Adresse courriel	marchand.denis@uqam.ca
	gauvin.chantal@irsst.qc.ca
	aubertin-leheudre.mylene@uqam.ca
Nom du superviseur principal	Alexis Brien-Breton
Adresse courriel de l'évaluateur	brien_alexis@hotmail.com
Membre de l'équipe	Jean-Philippe Leduc-Gaudet (Étudiant en kinésiologie) Haeila Vroye

But général du projet et direction :

Ce projet a pour but d'effectuer une présélection pour la poursuite du projet intitulé «Évaluation de la réponse physiologique au port de vêtements individuels de protection (VIP) : application à de nouvelles technologies pour les habits de pompiers (Phase 1 et phase2) ». Ce projet est réalisé dans le cadre d'une maîtrise de type recherche sous la direction du Dr Marchand et de la Dre Aubertin-Leheudre professeurs au département de kinanthropologie de la Faculté des sciences de l'UQAM. Le Dr Marchand peut être joint par téléphone au (514) 987-3000 poste 0217 ou par courriel à l'adresse suivante : marchand.denis@uqam. La Dre Aubertin-Leheudre peut être jointe par téléphone au (514) 987-3000 poste 5018 ou par courriel à l'adresse suivante : aubertin-leheudre.mylenc@uqam.ca. De plus, Chantal Gauvin de l'IRSST peut être joint par téléphone au (514) 288-1551 poste 357.

Procédure :

Vous êtes invité à participer à une visite de présélection à l'Université du Québec à Montréal. Cette visite vise à évaluer si le participant est admissible à la poursuite de l'étude intitulée «Évaluation de la réponse physiologique au port de vêtements individuels de protection (VIP) : application à de nouvelles technologies pour les habits de pompiers (Phase 1 et phase 2)». La visite consiste à prendre des mesures anthropométriques (taille, poids, indice de masse corporelle, pourcentage de gras, etc.). De plus, pendant cette visite le participant devra effectuer une séance d'activité physique visant à mesurer son Vo2max.

La visite de présélection à l'UQAM se déroulera comme suit:

Procédure de la visite	Temps alloué	Visite 1
-Explication du projet -Remplir le (QAAP) -Signature du formulaire de consentement -DXA	40 minutes (salle DEXA)	X
-Installer cardiofréquencemètre -Vo2max (Moxus) -Explication si admissible pour les prochaines visites	40 minutes	X

Composition corporelle

La composition corporelle sera mesurée par la méthode d'ostéodensitométrie. Cette méthode sera la même que celle utilisée pour mesurer la densité osseuse. Il s'agit d'un rayon x à double énergie qui détectera la différence de densité de chacun des tissus : os, muscles et organes, gras. Le sujet s'allongera sur le dos sur une table conçue à cet effet et un lecteur de densité circulera au-dessus du corps, de la tête aux pieds. La mesure totale prendra environ 5 minutes. La dose de radiation émise sera très faible (0.037 mrem). À titre de comparaison, deux radiographies dentaires équivalent à 20 mrem (3,4,5). Le test ne représente donc aucun risque irraisonnable pour le participant (6,7). Ce test nous permettra d'obtenir la masse maigre et la masse grasse totale, ainsi que la densité osseuse totale, des hanches et de la colonne (L1-L5).

Questionnaires

Questionnaire sur l'Aptitude à l'Activité Physique. Ce questionnaire est conçu pour les gens de 15 à 69 ans qui désirent pratiquer une activité physique. Questionnaire de *Cohen et coll.*, Ce questionnaire permet d'évaluer le niveau de la perception du stress du sujet en répondant à 14 questions. Questionnaire complémentaire sur la pratique d'activité physique. Ce questionnaire permet d'observer la pratique d'activité physique du sujet.

VO₂Max

Un test d'effort sous maximal sur tapis roulant servira à estimer votre consommation maximale d'oxygène (*VO₂Max*). Ce test vous permettra d'obtenir une évaluation précise de votre capacité aérobie à l'aide d'une mesure directe. La capacité aérobie est un des déterminants importants de la santé. Avant la passation du test, vous devrez avoir rempli un formulaire Q-AAP (Questionnaire sur l'attitude de l'activité physique). Le test se déroulera à la marche à vitesse constante, le niveau d'inclinaison du tapis sera augmenté chaque 3 minutes pour un total de 4 paliers. Afin que ce test soit sécuritaire et conforme aux recommandations de l'ACSM (*American College of Sports Medicine*), ce dernier sera arrêté dès que la valeur maximale de 1.2 pour votre coefficient respiratoire (RQ) sera atteinte ou que votre fréquence cardiaque s'élèvera au-delà de 85% de votre maximal théorique.

De plus, pour vous assurer une sécurité maximale, les évaluateurs auront une carte valide de formation en RCR et défibrillateur. De plus, un défibrillateur sera disponible dans la salle où le test sera exécuté. Finalement, le service de sécurité (responsable des urgences médicales) de l'UQAM (Pavillon Sciences Biologiques) sera informé par téléphone (poste # 3141) avant chaque test afin que ce dernier puisse répondre le plus rapidement en cas d'urgence.

AVANTAGES et RISQUES

Votre participation à cette étude vous permettra de connaître plusieurs mesures telles que votre Vo₂max, votre fréquence cardiaque, votre dépense énergétique lors d'une session d'activité physique. L'absorptiomètre biphotonique à rayon X (DEXA : Dual Energy X-ray Absorptiometry) vous permettra de connaître votre composition corporelle. Pour le test d'ostéodensitométrie (DEXA), la dose de radiation émise est très faible (0.037 mrem). À titre de comparaison, deux radiographies dentaires équivalent à 20 mrem. Le test ne représente donc aucun risque irraisonnable pour le sujet.

Si jamais il vous arrive un malaise de type cardiovasculaire, pour vous assurer une sécurité maximale, les évaluateurs auront une carte valide de formation en RCR et défibrillateur. De plus, un défibrillateur sera disponible dans la salle où le test sera exécuté. L'utilisation normale des appareils ne devrait causer aucun inconfort. Les risques associés à l'activité physique (VO₂Max) sont : essoufflement, souffle court, fatigue, inconfort musculaire suite à l'effort. Les participants peuvent ressentir des courbatures musculaires suite à la séance visant à mesurer le, mais ces dernières sont très minimales. L'utilisation normale des appareils ne devrait causer aucun inconfort.

Participation volontaire en cas de passation des tests de présélection

La participation du sujet à ce projet est volontaire. Cela signifie que le sujet accepte de participer au projet sans aucune contrainte ou pression extérieure, et que par ailleurs, le sujet est libre de mettre fin à sa participation en tout temps au cours de cette recherche. Dans ce cas les renseignements concernant le sujet seront détruits. L'accord du sujet à participer implique également qu'il accepte que le responsable du projet puisse utiliser aux fins de la présente recherche (articles, conférences et communications scientifiques) les renseignements recueillis à la condition qu'aucune information permettant d'identifier le sujet ne soit divulguée publiquement à moins d'un consentement explicite de votre part.

Retrait de la participation du sujet

Il est entendu que la participation du sujet au projet de recherche décrit ci-dessus est tout à fait volontaire et que le sujet reste, à tout moment, libre de mettre fin à sa participation sans avoir à motiver sa décision, ni à subir de préjudice de quelque nature que ce soit.

Par ailleurs, si durant l'étude, le sujet devait prendre une médication, le sujet serait alors contraint d'en aviser le chercheur et serait possiblement retirée de l'étude.

Arrêt du projet par le chercheur

S'il advenait que le chercheur décide d'arrêter le projet ou de discontinuer votre participation, il est entendu qu'il m'en fera part dans les plus brefs délais et justifiera une telle démarche. À ce moment, les résultats obtenus jusqu'à ce jour seront communiqués au sujet.

Compensation financière

Aucune compensation financière n'est prévue pour la phase de présélection de l'étude.

Autorisation de transmettre les résultats

Le sujet autorise les personnes responsables du projet à transmettre les résultats de votre évaluation à votre médecin traitant si cela s'avère pertinent, par exemple, dans le cas où l'évaluation permet de suspecter une anomalie

Oui Non

Nom et adresse du médecin traitant :

Étude ultérieure

Il se peut que les résultats obtenus dans le cadre de cette étude donnent lieu à une autre recherche. Dans cette éventualité, le sujet autorise à ce que son nom et ses coordonnées soient inclus dans une base de données afin de participer à d'autres expériences et que les personnes responsables de ce projet peuvent contacter le sujet et lui demander s'il est intéressé à participer à une nouvelle recherche.

Oui Non

Information confidentialité

L'information recueillie à propos du sujet lors de cette étude vise à évaluer si le candidat est éligible à la participation de la recherche intitulée «Évaluation de la réponse physiologique au port de vêtements individuels de protection (VIP) :

application à de nouvelles technologies pour les habits de pompiers (Phase 1 et phase 2)».

Les dossiers anonymes des participants ainsi que la clé des codes de sujets pour cette étude de recherche seront conservés sous clé à l'UQAM. L'accès aux dossiers anonymes de cette étude sera restreint aux membres de l'équipe impliqués dans cette recherche et seulement aux fins de cette étude. L'accès à la clé des codes de sujets pour cette étude sera strictement limité à la personne de l'équipe responsable de cette clé (Dr Marchand). Les dossiers anonymes seront conservés sous clé pour une période de 5 ans. Après cette période, ces dossiers seront détruits. À la demande du sujet, les renseignements le concernant seront détruits avant cette période. L'accord du sujet à participer implique également que le sujet accepte que l'équipe de recherche puisse utiliser aux fins de la présente recherche (articles, conférences et communications scientifiques) et à des fins pédagogiques, les renseignements recueillis à la condition qu'aucune information permettant d'identifier le sujet ne soit divulguée publiquement à moins d'un consentement explicite de votre part.

Sachant ceci, est-ce que le sujet accepte que l'information anonymisée recueillie à son propos lors de cette étude de recherche (provenant de mesures ou de questionnaires) soit utilisée dans des communications scientifiques (congrès, articles) et professionnelles ainsi que dans d'autres situations expérimentales.

Oui Non

Des questions sur le projet ou sur vos droits?

Cette recherche a reçu l'approbation du Comité de déontologie de la Faculté des sciences, un sous-comité du Comité institutionnel d'éthique de la recherche chez l'humain (CIÉR) de l'Université du Québec à Montréal (UQAM). Toutes questions sur le projet, plainte ou commentaire peut être adressé au chercheur. Pour toute question sur les responsabilités des chercheurs au plan de l'éthique de la recherche avec des êtres humains ou dans l'éventualité où la plainte ne peut leur être adressée directement, vous pouvez faire valoir votre situation auprès du comité d'éthique de la Faculté des sciences en contactant le Président du comité d'éthique M. Jean-Paul Guillemot (514-987-3000 poste 3606 ou guillemot.jean-paul@uqam.ca).

Remerciements

La collaboration des participants est essentielle à la réalisation de notre projet et l'équipe de recherche tient à remercier les participants. Si le participant souhaite obtenir un résumé écrit des principaux résultats de cette recherche, veuillez ajouter les coordonnées du sujet ci-dessous.

Déclaration du participant

Je déclare avoir eu suffisamment d'explications sur la nature et le motif de ma participation au projet de recherche. J'ai lu et compris les termes du présent formulaire de consentement et j'en ai reçu un exemplaire. Je consens volontairement à participer à ce projet de recherche. Je reconnais aussi que l'interviewer a répondu à mes questions de manière satisfaisante et que j'ai disposé suffisamment de temps pour réfléchir à ma décision de participer. Je comprends que ma participation à cette recherche est totalement volontaire et que je peux y mettre fin en tout temps, sans pénalité d'aucune forme, ni justification à donner. Il me suffit d'en informer la responsable du projet.

Nom (lettres moulées) : _____

Signature du sujet : _____

Date : _____

DÉCLARATION DU RESPONSABLE DE L'OBTENTION DU CONSENTEMENT

Je soussigné(e) _____, certifie avoir expliqué au signataire intéressé les termes du présent formulaire, avoir répondu aux questions qu'il m'a posées à cet égard ; lui avoir clairement indiqué qu'il reste, à tout moment, libre de mettre un terme à sa participation au projet de recherche décrit ci-dessus.

Signature du responsable de l'obtention du consentement :

Fait à Montréal, le _____ 2013.

ANNEXE B

FORMULAIRE DE CONSENTEMENT

FORMULAIRE D'INFORMATION ET DE CONSENTEMENT (PHASE 1)

Titre du projet

Évaluation de la réponse physiologique au port de vêtements individuels de protection (VIP): application à de nouvelles technologies pour les habits de pompiers (Phase 1).

Responsables du projet

Denis Marchand, Professeur-Chercheur au département de kinanthropologie, UQAM
Chantal Gauvin, Chercheur à l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et sécurité au travail

Mylène Aubertin-Leheudre, Professeur-Chercheur au département de kinanthropologie, UQAM

Objectifs du projet

Ce projet de recherche permettra d'évaluer l'efficacité de deux systèmes d'absorption de la chaleur composés de nouveaux matériaux à changement de phase (MCP) qui est possible d'insérer dans des vêtements individuels de protection (VIP) qui sont portés habituellement par des pompiers. Ces systèmes seront utilisés à l'intérieur d'un VIP standard et ils seront comparés à des conditions sans utilisation de MCP. Cette activité permettra d'évaluer l'impact et l'efficacité de ces nouvelles technologies pour réduire les contraintes thermophysiques par rapport aux systèmes ou technologies actuelles qu'on retrouve sur le marché. Cette réduction devrait se faire en absorbant une partie de la chaleur produite par le corps lors des situations d'efforts physiques modérés, ce qui permettra de diminuer la température du microclimat qui est habituellement présent dans à l'intérieur de ce type de vêtement.

Description de la méthodologie

Vous devrez réaliser un test de marche en tenue de sport avec quatre niveaux d'efforts progressifs pour atteindre 85 % de votre fréquence cardiaque maximale. Ce test sous maximal servira à prédire votre capacité cardio-respiratoire maximale (VO₂ max). Vous devrez aussi faire cinq tests de marche sur un tapis roulant qui auront une durée d'au moins 30 minutes. Les tests seront effectués à la vitesse qui correspond à

30 % de votre VO_2 max (consommation maximale d'oxygène) en tenue de sport. Le port d'un VIP augmentera considérablement l'intensité de l'exercice. Pour prévenir la fatigue entre les différents tests, vous disposerez d'une période minimale de repos de deux jours. Le port des VIP et la température ambiante peuvent accentuer votre sudation lors des tests. Vous serez fortement encouragés à boire des boissons contenant des électrolytes (exemple : Gatorade) quelques minutes après chaque test pour retrouver un niveau d'hydratation normal. Ces tests se dérouleront dans une chambre climatique où la température sera stable à 35°C ($\pm 1^{\circ}\text{C}$) et l'humidité relative à 50% ($\pm 5\%$).

La journée des tests, vous devrez respecter les consignes suivantes :

- Ne pas faire d'exercices soutenus 24 heures avant l'évaluation;
- Ne pas prendre de repas 2 heures avant l'évaluation;
- Ne pas prendre de drogue ou stimulant 12 heures avant l'évaluation;
- Faire la liste de la nourriture ingérée 12 heures avant l'évaluation;
- Boire 1 litre d'eau 2 heures avant le test et un autre 500 ml 30 minutes avant le test.

Lors des tests avec les VIP, vous devrez transmettre à l'expérimentateur votre perception d'effort physique toutes les minutes en pointant le niveau inscrit sur un panneau (avec une échelle de 6 à 20) situé très près de vous à droite du tapis roulant.

Avantages et risques

Comme étudiant en kinésiologie de l'UQAM vous vivrez une expérience de recherche appliquée au deuxième cycle où vous constaterez l'application des notions abordées dans votre programme de formation.

La consommation d'oxygène (VO_2), la fréquence cardiaque, la température corporelle cutanée et la température corporelle interne seront mesurées à l'aide de différents instruments. Vous devrez porter un masque pour la mesure de la VO_2 qui peut produire un certain niveau d'inconfort au visage. La température corporelle interne sera évaluée à l'aide d'une sonde jetable (Core Temperature Pill) que vous devrez ingérer. Celle-ci devra être ingérée une heure avant le début du test. Si vous éprouvez des difficultés à avaler des médicaments contenus dans des capsules (gélules), vous ne devriez pas participer à cette étude. Cette sonde va s'éliminer normalement dans un délai maximal de deux jours (48 heures)

Les responsables des évaluations s'engagent à exercer leur expertise professionnelle, en tenant compte des éléments exprimés dans ce document, afin de protéger la santé

et les droits des personnes évaluées. Ces personnes se réservent le droit de suspendre ou de mettre fin à votre participation selon les indications obtenues.

Confidentialité

Toutes les données recueillies sont confidentielles et uniquement des données moyennées serviront à la production d'un rapport de recherche et à des publications scientifiques. L'identification des personnes évaluées sera gardée confidentielle grâce à des transcriptions codées. Les données brutes seront conservées par les responsables des évaluations de l'UQAM et l'IRSST. Seuls les chercheurs responsables du projet auront accès aux fichiers informatiques des sujets et aux enregistrements vidéo. Les cassettes des enregistrements vidéo des sujets seront gardées sous clé dans un classeur. Toutes les données seront conservées pendant cinq ans avant d'être détruites ou jusqu'à publication scientifique qui se fera également à l'intérieur de ces cinq ans.

Participation volontaire

Votre participation à ce projet est volontaire. Cela signifie que vous acceptez de participer au projet sans aucune contrainte ou pression extérieure, et que par ailleurs vous êtes libre de mettre fin à votre participation en tout temps au cours de cette recherche. Dans ce cas, les renseignements vous concernant seront détruits. Votre accord à participer implique également que vous acceptez que l'équipe de recherche puisse utiliser aux fins de la présente recherche (articles, mémoires, thèses, conférences et communications scientifiques) les renseignements recueillis à la condition qu'aucune information permettant de vous identifier ne soit divulguée publiquement à moins d'un consentement explicite de votre part.

Compensation

Il est entendu que vous recevrez au terme de la séance une indemnisation proportionnelle à celle consentie à un assistant de recherche en vertu de la convention de la SETUE à l'UQAM. Cette compensation sert à rembourser les frais encourus par votre contribution au projet.

Des questions sur le projet ou sur vos droits?

Ce projet a été approuvé par le Comité institutionnel d'éthique de la recherche de l'UQAM (CIÉR). Vous pouvez contacter le chercheur principal pour des questions additionnelles sur le projet ou sur vos droits en tant que sujet de recherche. Pour des informations concernant les responsabilités de l'équipe de chercheurs au plan de l'éthique de la recherche ou pour formuler une plainte. Le Comité institutionnel d'éthique de la recherche avec des êtres humains de l'UQAM (CIÉR) a approuvé le projet de recherche auquel vous allez participer. Pour des informations concernant les responsabilités de l'équipe de recherche au plan de l'éthique de la recherche avec des êtres humains ou pour formuler une plainte, vous pouvez contacter madame Christa

Japel au numéro (514) 987-3000 # 5647 ou par l'intermédiaire du secrétariat du CIÉR
au numéro (514) 987-3000 # 7753 ou par courriel à CIEREH@UQAM.CA

Remerciements

Votre collaboration est essentielle à la réalisation de notre projet et l'équipe de recherche tient à vous en remercier. Si vous souhaitez obtenir un résumé écrit des principaux résultats de cette recherche, veuillez ajouter vos coordonnées ci-dessous.

Signatures :

J'ai pris connaissance de l'information contenue dans ce formulaire, les chercheurs ont répondu à mes interrogations de façon satisfaisante et je comprends les procédures. Je peux me retirer en tout temps de ce projet sans aucune pénalité. Je consens librement à participer à ce projet de recherche.

J'accepte que des extraits d'enregistrements vidéos sur lesquels j'apparais puissent être utilisés dans des publications scientifiques ou lors de conférence à condition que mon visage soit masqué :

OUI **NON**

Participant(e) (lettres moulées) : _____

Masculin Féminin

Âge : _____

Signature :

Participant : _____

Date : _____

Alexis Brien-Breton (étudiant responsable) : _____

Date : _____

Responsables du projet

Denis Marchand Ph.D.
Département de kinanthropologie
Université du Québec à Montréal
Tél : (514)-987-3000 # 0217

Chantal Gauvin
Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail
Tél.: (514) 288-1551 # 357

ANNEXE C

QAAP

Q-AAP et VOUS

(Un questionnaire pour les gens de 15 à 69 ans)

Questionnaire sur l'aptitude à l'activité physique - Q-AAP (version révisée en 2002)

L'exercice physique pratiqué d'une façon régulière constitue une occupation de loisir saine et agréable. D'ailleurs, de plus en plus de gens pratiquent une activité physique de façon régulière. Règle générale, augmenter la pratique sportive n'entraîne pas de risques de santé majeurs. Dans certains cas, il est cependant conseillé de passer un examen médical avant d'entreprendre un programme régulier d'activités physiques. Le Q-AAP (questionnaire sur l'aptitude à l'activité physique) vise à mieux cerner les personnes pour qui un examen médical est recommandé.

Si vous prévoyez modifier vos habitudes de vie pour devenir un peu plus actif(ve), commencez par répondre aux 7 questions qui suivent. Si vous êtes âgé(e) de 15 à 69 ans, le Q-AAP vous indiquera si vous devez ou non consulter un médecin avant d'entreprendre votre nouveau programme d'activités. Si vous avez plus de 69 ans et ne participez pas d'une façon régulière à des activités physiques exigeantes, vous devriez consulter votre médecin avant d'entreprendre ces activités.

Lisez attentivement et répondez honnêtement à chacune des questions suivantes. Le simple bon sens sera votre meilleur guide pour répondre correctement à ces questions. Cochez OUI ou NON.

OUI	NON	
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1. Votre médecin vous a-t-il déjà dit que vous souffriez d'un problème cardiaque et que vous ne deviez pas participer qu'à des activités physiques prescrites et approuvées par un médecin?
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	2. Ressentez-vous une douleur à la poitrine lorsque vous faites de l'activité physique?
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3. Au cours de dernier mois, avez-vous ressenti des douleurs à la poitrine lors de périodes autres que celles où vous participez à une activité physique?
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	4. Éprouvez-vous des problèmes d'équilibre reliés à un étourdissement ou vous arrive-t-il de perdre connaissance?
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	5. Avez-vous des problèmes osseux ou articulaires (par exemple, au dos, au genou ou à la hanche) qui pourraient s'aggraver par une modification de votre niveau de participation à une activité physique?
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	6. Des médicaments vous sont-ils actuellement prescrits pour contrôler votre tension artérielle ou un problème cardiaque (par exemple, des diurétiques)?
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	7. Connaissez-vous une autre raison pour laquelle vous ne devriez pas faire de l'activité physique?

Si vous

avez

répondu

OUI à une ou plusieurs questions

Consultez votre médecin AVANT d'augmenter votre niveau de participation à une activité physique et AVANT de faire évaluer votre condition physique. Dites à votre médecin que vous avez complété le questionnaire sur l'aptitude à l'activité physique et expliquez-lui précisément à quelles questions vous avez répondu «OUI».

- Il se peut que vous n'ayez aucune contre-indication à l'activité physique dans la mesure où vous allez lentement et progressivement. Par ailleurs, il est possible que vous ne puissiez faire que certains types d'efforts adaptés à votre état de santé. Indiquez à votre médecin le type d'activité physique que vous comptez faire et suivez ses recommandations.
- Informez-vous quant aux programmes d'activités spécialisés les mieux adaptés à vos besoins, offerts dans votre localité.

NON à toutes ces questions

Si, en toute honnêteté, vous avez répondu «NON» à toutes les questions du Q-AAP vous êtes dans une certaine mesure, assuré(e) que :

- vous pouvez augmenter votre pratique régulière d'activités physiques en commençant lentement et en augmentant progressivement l'intensité des activités pratiquées. C'est le moyen le plus simple et le plus sécuritaire d'y arriver.
- vous pouvez faire évaluer votre condition physique. C'est le meilleur moyen de connaître votre niveau de condition physique de base afin de mieux planifier votre participation à un programme d'activités physiques.

REMETTRE À PLUS TARD L'AUGMENTATION DE VOTRE PARTICIPATION ACTIVE :

- si vous souffrez présentement de fièvre, d'une grippe ou d'une autre affection passagère, attendez d'être remis(e), ou
- si vous êtes enceinte ou croyez l'être, consultez votre médecin avant de modifier votre niveau de pratique sportive régulière.

Veillez noter que si votre état de santé se trouve modifié de sorte que vous devez répondre «OUI» à l'une ou l'autre des questions précédentes, consultez un professionnel de la santé ou de la condition physique, afin de déterminer s'il vous faut modifier votre programme d'activités.

Formulaire de consentement du Q-AAP. La Société canadienne de physiologie de l'exercice, Santé Canada et ses représentants n'assument aucune responsabilité vis-à-vis des accidents qui pourraient survenir lors de l'activité physique. Si, après avoir complété le questionnaire ci-dessus, un doute persiste quant à votre aptitude à faire une activité physique, consultez votre médecin avant de vous y engager.

Toute modification est interdite. Nous vous encourageons à copier le Q-AAP dans sa totalité.

Dans la mesure où le Q-AAP est administré avant que la personne ne s'engage dans un programme d'activités ou qu'elle fasse évaluer sa condition physique, la section suivante constitue un document ayant une valeur légale et administrative.

«Je soussigné(e) affirme avoir lu, compris et complété le questionnaire et avoir reçu une réponse satisfaisante à chacune de mes questions.»

NOM _____

SIGNATURE _____

DATE _____

SIGNATURE D'UN PARENT
ou TUTEUR (pour les mineurs) _____

TEMPS _____

III.3. — Cette autorisation de faire de l'activité physique est valide pour une période maximale de 12 mois à compter du moment où le questionnaire est rempli. Elle n'est plus valide si votre état de santé change du fait de ce que vous répondez «OUI» à l'une des sept questions.



© Société canadienne de physiologie de l'exercice www.csep.ca/forms

ANNEXE D

PROCÉDURE DE TEST

VISITE #__

PARTICIPANT ID : _____ DATE : __/__/_____
HEURE DE D'ARRIVÉE : _____
DATE DE NAISSANCE (JOUR/MOIS/ANNÉE) : __/__/_____
ÂGE : _____
TAILLE (CM) : _____

EXPLICATIONS DE LA VISITE

RESTRICTIONS :

- | | |
|---|---|
| <input type="checkbox"/> CAFÉINE | <input type="checkbox"/> OUI |
| <input type="checkbox"/> DROGUE | <input type="checkbox"/> NON, JUSTIFIEZ |
| <input type="checkbox"/> ALCOOL | |
| <input type="checkbox"/> TABAGISME | |
| <input type="checkbox"/> REPAS RICHE AVANT L'EFFORT PHYSIQUE (2 HEURES) | |

**Remise du journal alimentaire
24 heures avant l'évaluation**

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 :	
	Contacteur le client 24h avant (rappel : tenue sport, pas de café, drogue , alcool, pas d'exercices, mettre le armband, pas de gros repas 2h 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 le main switch du tapis roulant et le mettre à « on »	
	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 PCM SI APPLICABLE	g
	Apporter le défibrillateur, le BIA et la machine pour prendre la pression 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)	
	Description de la séance, expliquer l'échelle de Borg	
	Télécharger les données du armband et recharger le armband	
	Permettre au sujet d'aller aux toilettes et éviter à ce point de boire de l'eau ou d'uriner	
	Prendre le poids du sujet en boxer	kg.
	Prendre le BIA du sujet	

	Mettre la jaquette et retirer le sous-vêtement	
	Mettre le chandail, les shorts, les bas, le boxer, le harnais polar, le harnais biopac et la veste PCM SI APPLICABLE dans un cabaret pour aller effectuer la pesée	
	Peser le boxer seulement	_____ g.
	Peser le chandail, les shorts, les bas, le boxer, la bande polar, le harnais équival	_____ g.
	Ramener la tenue de sport au sujet et lui demander de la mettre (sauf le chandail)	
	Asseoir le sujet et lui installer la bande polar le laisser se reposer pour 5 minutes	
	Prendre la FC de repos	_____ bpm
	Prendre la saturation d'O₂	_____ %
	Prendre la pression artérielle 3 fois	____ / ____ / ____ Sys ____ / ____ / ____ Dia
	Poser les capteurs de température externe et expliquer en même temps au sujet l'échelle de Borg et comment arrêter le tapis en cas d'urgence	
	Préparer le « subject data » pour le Moxus et mettre en standby sur start study	
	Demander au sujet de mettre son chandail	
	Vérifier la température et l'humidité sur le WBGT et la noter	_____ °C _____ %
	Demander au sujet de mettre la veste PCM SI APPLICABLE	
	Poser le brassard équival par-dessus le chandail et la veste PCM SI APPLICABLE	
	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 bombonne	
	Prendre le poids du sujet avec tous les équipements	_____ kg
	Prendre la FC du sujet debout	_____ bpm
	Déterminer la pente et 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 start study sur le logiciel du moxus afin de commencer l'enregistrement et noter l'heure affichée sur l'horloge de l'ordinateur (idéalement incluant les secondes)	__ h __ m __ s
	Démarrer le tapis roulant à la vitesse et la pente requise	
	Prendre les mesures de l'échelle de Borg au 5 minutes pour les 20 premières minutes, toutes les 2 minutes 30 pour les 10 minutes suivantes et toutes les minutes après 30 minutes (monitorer en même temps la température cutanée et interne et	Noter sur les feuilles subséquentes

la fc pour valider les critères d'arrêts)		
FIN DU TEST		
Noter la durée totale du test		m s
Arrêter la chambre climatique 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 températures) et ne garder que les boxers		
Peser le sujet en boxer		kg
Prendre le BIA		
Mettre la jaquette retirez les boxers 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 3 fois (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 éteindre le capteur SEM équival		
Mettre le chandail, les shorts, les bas, le boxer, le harnais polar, le harnais biopac et la veste PCM <u>SI APPLICABLE</u> dans un cabaret pour aller effectuer la pesée		
Peser le boxer seulement		g
Peser la veste PCM <u>SI APPLICABLE</u>		g
Peser le chandail, les shorts, les bas, le boxer, la bande polar le harnais équival		g
Peser le VIP (Pantalon et veste)		kg
Faire passer les questionnaires nécessaires au sujet		
Redonner le armband		
Rescéduler un rendez-vous		
Monitorer le patient 15 minutes en ambiance contrôlée		
Retourner défibrilateur au gym		
Laver les différents instruments de mesure		
Recharger les PCM <u>SI APPLICABLE</u>		
Collecter et sauvegarder et archiver les données		
Noter les évènements particuliers		

Temps (min : sec)	Échelle de Borg (6-20)	Température °C	
		Cutanée moyenne	Interne
5 :00			
10 :00			
15 :00			
20 :00			
22 :30			
25 :00			
27 :30			
30 :00			
31 :00			
32 :00			
33 :00			
34 :00			
35 :00			
36 :00			
37 :00			
38 :00			
39 :00			
40 :00			
41 :00			
42 :00			
43 :00			
44 :00			
45 :00			
46 :00			
47 :00			
48 :00			
49 :00			
50 :00			
51 :00			
52 :00			
53 :00			
54 :00			
55 :00			
56 :00			
57 :00			
58 :00			
59 :00			
60 :00			
61 :00			
62 :00			
63 :00			
64 :00			
65 :00			

66 :00			
67 :00			
68 :00			
69 :00			
70 :00			
71 :00			
72 :00			
73 :00			
74 :00			
75 :00			
76 :00			
77 :00			
78 :00			
79 :00			
80 :00			
81 :00			
82 :00			
83 :00			
84 :00			
85 :00			
86 :00			
87 :00			
88 :00			
89 :00			
90 :00			
91 :00			
92 :00			
93 :00			
94 :00			
95 :00			
96 :00			
97 :00			
98 :00			
99 :00			
100 :00			
101 :00			
102 :00			
103 :00			
104 :00			
105 :00			
106 :00			
107 :00			
108 :00			
109 :00			
110 :00			

EFFET MCP

SENSATION DE FRAÎCHEUR DURANT LES 20 PREMIÈRES MINUTES :

- OUI
- NON

SYMPTÔMES PHYSIQUES RESSENTIS DURANT L'EFFORT

- SENSATION D'AVOIR TROP CHAUD
- SENSATION DE FATIGUE
- SOIF
- ÉTOURDISSEMENTS
- NAUSÉE
- FRISSONS
- MAUX DE TÊTE
- CRAMPES MUSCULAIRES

REMISE DU ARMBAND**PROCHAINE VISITE**

DATE DE LA PROCHAINE VISITE : __/__/__ HEURE : _____

PARTICIPANT ID : _____ RESPONSABLE: _____

HEURE DE DÉPART : _____

ANNEXE E

DÉPENSE ÉNERGÉTIQUE 24H PRÉ-TEST

Temps	Calories (moyenne quotidienne)	Dépense énergétique liée à l'activité physique moy. quot.	Met moyen	% de port du Armband
PO-P01				
7 jours	4131	1749	2.0	96.30
24h pré visite 1	2135	2058	2.0	99.20
24h pré visite 2	2103	1830	2.0	99.20
24h pré visite 3	2408	2599	2.3	98.60
PO-P02				
7 jours	N/A	N/A	N/A	N/A
24h pré visite 1	1873	1291	2.0	94.70
24h pré visite 2	1826	1588	2.6	57.90
24h pré visite 3	1883	1437	2.0	98.10
PO-P03				
7 jours	3466	1038	1.7	96.40
24h pré visite 1	1841	1185	1.8	97.60
24h pré visite 2	1775	1056	1.7	98.50
24h pré visite 3	1838	1228	1.8	98.50
PO-P05				
7 jours	N/A	N/A	N/A	N/A
24h pré visite 1	1082	302	1.4	89.10
24h pré visite 2	1052	242	1.4	64.50
24h pré visite 3	1145	424	1.5	78.30
PO-P06				
7 jours	3885	1773	2.1	97.60
24h pré visite 1	2085	2489	2.3	99.10
24h pré visite 2	1874	2738	2.3	98.60
24h pré visite 3	2165	2317	2.2	98.60

Temps	Calories (moyenne quotidienne)	Dépense énergétique liée à l'activité physique	Met moyen	% de port du Armband
PO-P07				
7 jours	N/A	N/A	N/A	N/A
24h pré visite 1	N/A	N/A	N/A	N/A
24h pré visite 2	1621	788	1.6	100.00
24h pré visite 3	1674	1104	1.7	100.00
PO-P08				
7 jours	3614	1495	1.9	96.10
24h pré visite 1	1764	1367	1.8	99.80
24h pré visite 2	1583	888	1.6	100.00
24h pré visite 3	1674	1149	1.7	100.00

BIBLIOGRAPHIE

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

Aoyagi, Y., McLellan, T. M. & Shephard, R. J. (1994). Effects of training and acclimation on heat tolerance in exercising men wearing protective clothing. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 68(3), 234-245.

Armstrong, L. E. (2005). Hydration assessment techniques. *Nutrition reviews*, 63(s1), S40-S54.

ASTM F1868-09. (2009). Standard test method for thermal and evaporative resistance of clothing materials using a sweating hot plate. ASTM International, Philadelphia.

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., 3^{ème} 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.

Bar-Or, O., Lundegren, H. M. & Buskirk, E. R. (1969). Heat tolerance of exercising obese and lean women. *Journal of applied physiology*, 26(4), 403-409.

Barstow, T. J., Jones, A. M., Nguyen, P. H. & Casaburi, R. (1996). Influence of muscle fiber type and pedal frequency on oxygen uptake kinetics of heavy exercise. *Journal of Applied Physiology*, 81(4), 1642-1650.

- 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.
- Benzinger, T. H. (1969). Heat regulation: homeostasis of central temperature in man. *Physiological Reviews*, 49(4), 671-759.
- Bergeron, M. F. (2003). Heat cramps: fluid and electrolyte challenges during tennis in the heat. *Journal of science and medicine in sport*, 6(1), 19-27.
- 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.
- Buono, M. J. & Sjöholm, N. T. (1988). Effect of physical training on peripheral sweat production. *Journal of Applied Physiology*, 65(2), 811-814.
- 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.

Christensen, E.H. (1953). Physiological evaluation of work in Nykroppa Iron Works. In Lloyd WF, Welford AT (eds) fatigue. H.K. Lewis, London.

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.

Davis, P. O. & Santa Maria, D. L., (1975). Energy Costs of Wearing Fire Fighter's Protective Equipment. *International Fire Chief*, Vol. 41, pp. 10-11.

Davis, P. O., Dotson, C. O. & Santa Maria, D. L. (1981). Relationship between simulated fire fighting tasks and physical performance measures. *Medicine and science in sports and exercise*, 14(1), 65-71.

Dill, D. B., Soholt, L. F., McLean, D. C., Drost Jr, T. F. & Loughran, M. T. (1976). Capacity of young males and females for running in desert heat. *Medicine and science in sports*, 9(3), 137-142.

Duncan, H. W., Gardner, G. W. & James Barnard, R. (1979). Physiological responses of men working in firefighting equipment in the heat. *Ergonomics*, 22(5), 521-527.

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., Dufлот, 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.

Gaesser, G. A. & Poole, D. C. (1988). Blood lactate during exercise: time course of training adaptation in humans. *Int J Sports Med*, 9(4), 284-8.

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.

Gagge, A. P., Winslow, C. E. & Herrington, L. P. (1938). The influence of clothing on the physiological reactions of the human body to varying environmental temperatures. *American Journal of Physiology--Legacy Content*, 124(1), 30-50.

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. (2011). 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. (2011). 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.

Hardy, J. D. & Soderstrom, G. F. (1938). Heat Loss from the Nude Body and Peripheral Blood Flow at Temperatures of 22° C. to 35° C. Two Figures. *The journal of Nutrition*, 16(5), 493-510.

Henschel, A. (1969). Age and heat tolerance (no. Tr-66). Bureau of occupational safety and health Rockville md.

Henschel, A. (1971). *The environment and performance. Physiology of work capacity and fatigue*. CC Thomas, Springfield, Illinois, publisher, 14, 325-47.

ISO 11079:2008. (2008). *Ergonomie des ambiances thermiques – Détermination et interprétation de la contrainte liée au froid en utilisant l'isolement thermique requis du vêtement (IREQ) et les effets du refroidissement local*. ISO – Organisation internationale de normalisation, Genève.

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.

ISO 7933:2005. (2005). Ergonomie des ambiances thermiques – Détermination analytique et interprétation de la contrainte thermique fondée sur le calcul de l'astreinte thermique prévisible. ISO – Organisation internationale de normalisation, Genève.

ISO 8996:2004. (2004). Ergonomie de l'environnement thermique – Détermination du métabolisme énergétique. ISO – Organisation internationale de normalisation, Genève.

ISO 9886:2004. (2004). Évaluation de l'astreinte thermique par mesures physiologiques. 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.

Lemon, P. W. R. & Hermiston, R. T. (1977). Physiological profile of professional fire fighters. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 19(5), 337-340.

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.

Marchand D., Tremblay G. & Tellier C. (2006). Évaluation des contraintes physiques associées au port de différents vêtements individuels de protection des pompiers. *Rapport de recherche IRSST*. R-444. 137 p.

Marieb E. N. (2005) *"Anatomie et physiologie humaine."* Éditions De Boeck Université. Erpi. 1290p.

Martinet, C. (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.

Meunier, P. (2009) Cardiofréquencemétrie: bases pratiques d'interprétation et classification des traces. Journée « Cœur et Travail », Société de Santé au Travail de Lyon

Mitchell, D., Wyndham, C. H., Vermeulen, A. J., Hodgson, T., Atkins, A. R. & Hofmeyr, H. S. (1969). Radiant and convective heat transfer of nude men in dry air. *Journal of applied physiology*, 26(1), 111-118.

Morrissey, S. J. (1998). Work place design recommendations for the pregnant worker. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 21(5), 383-395.

Nadel, E. R., Pandolf, K. B., Roberts, M. F. & Stolwijk, J. A. (1974). Mechanisms of thermal acclimation to exercise and heat. *Journal of Applied Physiology*, 37(4), 515-520.

NFPA 1971:2007. (2007). Standard on protective ensembles for structural fire fighting and proximity fire fighting. National Fire Protection Association.

Nielsen, B. & Nielsen, M. (1965). On the regulation of sweat secretion in exercise. *Acta Physiologica Scandinavica*, 64(4), 314-322.

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.

Pandolf, K. B. (1998). Time course of heat acclimation and its decay. *International journal of sports medicine*, 19(S 2), S157-S160.

Parsons, K. (2002). Human thermal environments: the effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort and performance. Crc Press.

Savastano, D. M., Gorbach, A. M., Eden, H. S., Brady, S. M., Reynolds, J. C. & Yanovski, J. A. (2009). Adiposity and human regional body temperature. *The American journal of clinical nutrition*, 90(5), 1124-1131.

Sawka, M. N., Young, A. J., Latzka, W. A., Neuffer, P. D., Quigley, M. D. & Pandolf, K. B. (1992). Human tolerance to heat strain during exercise: influence of hydration. *Journal of Applied Physiology*, 73(1), 368-375.

Scherrer, J., (1981). *Précis de physiologie du travail notions d'ergonomie*. Masson, Paris. 585 p.

Shibolet, S., Lancaster, M. C. & Danon, Y. (1976). Heat stroke: a review. *Aviation, space, and environmental medicine*, 47(3), 280.

Sköldström, B. (1987). Physiological responses of fire fighters to workload and thermal stress. *Ergonomics*, 30(11), 1589-1597.

Smolander, J., Louhevaara, V. & Korhonen, O. (1985). Physiological strain in work with gas protective clothing at low ambient temperature. *The American Industrial Hygiene Association Journal*, 46(12), 720-723.

Stephenson, L. A. & Kolka, M. A. (1993). Thermoregulation in women. *Exercise and sport sciences reviews*, 21(1), 231-262.

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*.

Vogt J.J. & Metz B. (1981) Ambiances thermiques, in : Scherrer J. et coll., *Précis de physiologie du travail, notions d'ergonomie*, Masson, 2^{ème} édition, 217-263

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.

Wells, C. L. (1979). Responses of physically active and acclimatized men and women to exercise in a desert environment. *Medicine and science in sports and exercise*, 12(1), 9-13.

Wilmore, J.H. & Costill, D.L. (2002). *Physiologie du sport et de l'exercice*. 2e édition. DeBoeck. Université, Paris, 736 page.

Wilson, P. W., D'Agostino, R. B., Sullivan, L., Parise, H. & Kannel, W. B. (2002). Overweight and obesity as determinants of cardiovascular risk: the Framingham experience. *Archives of internal medicine*, 162(16), 1867-1872.