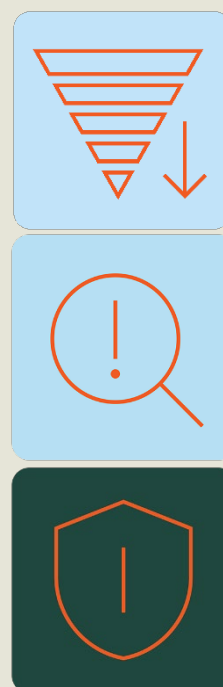


Contraintes thermophysiological associées aux vêtements individuels de protection des pompiers : impact et efficacité des membranes barrières et des designs du vêtement

Denis Marchand, UQAM
Chantal Gauvin, IRSST
Marie-Anne Landry-Duval, UQAM

R-1183-fr





NOS RECHERCHES travaillent pour vous !

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

Mission

Dans l'esprit de la Loi sur la santé et la sécurité du travail (LSST) et de la Loi sur les accidents du travail et les maladies professionnelles (LATMP), la mission de l'IRSST est de :

Contribuer à la santé et à la sécurité des travailleuses et travailleurs par la recherche, l'expertise de ses laboratoires, ainsi que la diffusion et le transfert des connaissances, et ce, dans une perspective de prévention et de retour durables au travail.

Pour en savoir plus

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

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement :

- au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CNESST (preventionautravail.com)
- au bulletin électronique [InfoIRSST](#)

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2023
978-2-89797-267-7 (PDF)

© Institut de recherche Robert-Sauvé en santé
et en sécurité du travail, 2023

IRSST — Service des communications
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec) H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca



NOS RECHERCHES travaillent pour vous !

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

Mission

Dans l'esprit de la Loi sur la santé et la sécurité du travail (LSST) et de la Loi sur les accidents du travail et les maladies professionnelles (LATMP), la mission de l'IRSST est de :

Contribuer à la santé et à la sécurité des travailleuses et travailleurs par la recherche, l'expertise de ses laboratoires, ainsi que la diffusion et le transfert des connaissances, et ce, dans une perspective de prévention et de retour durables au travail.

Pour en savoir plus

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

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement :

- au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CNESST (preventionautravail.com)
- au bulletin électronique [InfoIRSST](#)

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2023
978-2-89797-267-7 (PDF)

© Institut de recherche Robert-Sauvé en santé
et en sécurité du travail, 2023

IRSST — Service des communications
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec) H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Carole Roy, professionnelle de recherche spécialisée dans les mesures physiologiques au Département de kinanthropologie de l'Université du Québec à Montréal (UQAM), responsable de l'installation des équipements et du soutien aux étudiants lors de la prise des mesures et du traitement des données.

Ils expriment leur reconnaissance envers le technicien en électronique de l'UQAM, Antoine Parrinello, qui a réalisé les montages électroniques utilisés dans cette étude et envers Benoit Sansregret, technicien en audiovisuel, pour le montage des photos.

Les auteurs remercient les étudiants Émile Cotton et Marion Poirier pour leur participation à la prise des mesures et à l'analyse des résultats.

Les auteurs expriment leur reconnaissance envers les chercheurs du Groupe CTT, dont Dominic Tessier pour sa contribution au développement des nouvelles technologies de membranes barrières, ainsi que Justine Decaens et Ahmad Ibrahim pour le suivi du projet. Ils remercient également les compagnies chez qui l'équipe de recherche s'est procuré les membranes barrières et les habits de pompier, pour leur collaboration.

SOMMAIRE

Les vêtements individuels de protection (VIP) contribuent aux contraintes thermiques et physiologiques subies par les travailleurs. Or, ces contraintes constituent un problème préoccupant pour la santé et la sécurité, notamment pour les pompiers. D'ailleurs, les contraintes thermophysiques sont associées à un risque accru d'événements cardiovasculaires, qui représentent la cause la plus fréquente de décès chez les pompiers. L'objectif de cette étude était d'évaluer la réponse physiologique au port de VIP pour les pompiers, munis de deux membranes barrières humidifuges, dont l'une, ayant des propriétés de perméabilité à la vapeur d'eau et de transfert de chaleur améliorées. Un nouveau concept qui devait permettre d'assurer une meilleure circulation de l'air dans la zone dorsale du VIP a aussi été évalué. Ces membranes et ce nouveau concept sont basés sur de nouvelles technologies ayant le potentiel de réduire les contraintes thermophysiques des pompiers.

Dix participants ont réalisé des tests de marche à 5 km/h sur un tapis roulant dans une chambre climatique où la température (35 °C) et l'humidité relative (50 %) étaient contrôlées. La charge de travail était ajustée via l'inclinaison du tapis de façon à obtenir un effort à 30 % de la consommation maximale d'oxygène du participant. Les cinq conditions de VIP évaluées comprenaient deux membranes barrières (M1 et M2 [améliorée]), lesquelles étaient intégrées dans deux designs d'habits (Traditionnel et Innovateur) et un nouveau système d'aération. Les astreintes thermiques engendrées par les différentes conditions expérimentales étaient évaluées à l'aide des variables suivantes : la consommation d'oxygène, la température corporelle interne, le coût cardiaque de travail, la perte hydrique, l'humidité relative et la température à l'intérieur du VIP (dans la couche interne et dans la couche externe), ainsi que la perception psychophysique de l'effort par les participants.

Les principaux résultats suggèrent que la membrane barrière de nouvelle génération (M2) obtient une perception psychophysique de l'effort moins élevée que l'autre membrane pour les 20 dernières minutes du test. Les modifications de design du modèle Innovateur ne permettent pas de diminuer les contraintes physiologiques à l'effort. En effet, l'humidité relative dans la couche interne du modèle Innovateur n'est pas statistiquement différente de celle du modèle Traditionnel, et la température dans la couche interne du modèle Innovateur est significativement plus élevée que celle du modèle Traditionnel. Le modèle Innovateur cause un inconfort pour le cou et les hanches lors de la flexion du tronc. En présence du support de l'appareil de protection respiratoire autonome, le nouveau système d'aération dans la zone dorsale ne réduit pas les contraintes thermophysiques dans une situation d'effort prolongé de 45 minutes.

Les résultats de cette recherche démontrent l'importance d'améliorer l'efficacité des matériaux qui composent les VIP. En effet, malgré un effort physique relativement bas imposé par la pente et la vitesse du tapis roulant, aucune des conditions évaluées ne

permet une stabilisation des variables associées au processus de thermorégulation. La température interne du corps et la fréquence cardiaque augmentent progressivement durant toute la durée du test. Pour expliquer l'augmentation constante de ces deux variables physiologiques, l'humidité relative à l'intérieur du VIP, qui devient supérieure à 80 % après quelques minutes d'effort, doit être mise en cause. La présence d'un microclimat, où l'air contient 80 % du maximum de vapeur d'eau qu'il peut absorber, limite beaucoup l'évaporation de la sueur à la surface de la peau. Pour réussir à réduire les contraintes thermophysiques, il semble impératif de développer des matériaux capables d'abaisser l'humidité relative à l'intérieur des VIP.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	9
1. ÉTAT DES CONNAISSANCES	11
1.1 Microclimat à l'intérieur des VIP	11
1.2 Amélioration de la membrane barrière et du design des VIP.....	14
2. OBJECTIFS.....	17
3. MÉTHODOLOGIE	18
3.1 Participants et critères d'inclusion	18
3.2 Caractéristiques des VIP (variables indépendantes étudiées).....	19
3.2.1 Deux designs d'habits	19
3.2.2 Deux membranes barrières	21
3.2.3 Système d'aération.....	23
3.3 Conditions expérimentales.....	23
3.3.1 Conditions de VIP.....	23
3.3.2 Conditions à l'effort et environnement de la chambre climatique	26
3.4 Variables physiologiques mesurées durant les tests sur le tapis roulant	27
3.4.1 Consommation d'oxygène	27
3.4.2 Température corporelle interne	28
3.4.3 Fréquence cardiaque.....	29
3.4.4 Humidité relative et température à l'intérieur du VIP	29
3.4.5 Perte hydrique	31
3.4.6 Évaluation psychophysique de l'effort.....	31
3.5 Procédure lors des tests sur le tapis roulant	32
3.6 Tests d'appréciation subjective du confort	33
3.7 Analyses statistiques	35
4. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	36
4.1 Résultats des tests sur le tapis roulant.....	36
4.1.1 Consommation d'oxygène	36
4.1.2 Perception psychophysique de l'effort	37
4.1.3 Fréquence cardiaque.....	38
4.1.4 Température à l'intérieur des VIP	39
4.1.5 Humidité relative à l'intérieur des VIP	42

4.1.6	Température corporelle interne	45
4.1.7	Perte hydrique	47
4.2	Résultats des tests d'appréciation subjective du confort	49
5.	LIMITES DE L'ÉTUDE.....	51
	CONCLUSION.....	52
	BIBLIOGRAPHIE	54
	ANNEXE A	59
A.I	Test de prédiction de la consommation d'oxygène maximale à la marche	59
	ANNEXE B	61
B.I	Procédures à suivre lors des évaluations.....	61
	ANNEXE C	63
C.I	Grille d'appréciation du confort des VIP	63

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Caractéristiques des participants	19
Tableau 2.	Caractéristiques des matériaux formant les VIP	22
Tableau 3.	Ordre de passation des tests pour les 10 participants	24
Tableau 4.	Masse de la coque extérieure des VIP	25
Tableau 5.	Poids des cinq différentes conditions de VIP (kg).....	26
Tableau 6.	Résultats des analyses statistiques obtenues pour la consommation d'oxygène (VO ₂). (N=10).....	36
Tableau 7.	Résultats statistiques de l'appréciation psychophysique des participants (échelle de Borg 6 à 20) (N=10)	37
Tableau 8.	Résultats statistiques de l'augmentation des battements de travail des participants (N=10)	39
Tableau 9.	Résultats statistiques de la température à l'intérieur des couches interne et externe des VIP (N=10)	41
Tableau 10.	Résultats statistiques de l'humidité relative à l'intérieur de la couche interne et externe des VIP (N=10)	44
Tableau 11.	Résultats statistiques de l'augmentation de la température interne des participants (N=10)	46
Tableau 12.	Résultats statistiques du pourcentage de perte de masse des participants après le test. Mesures réalisées en sous-vêtement (N=10).....	48
Tableau 13.	Résultats statistiques du pourcentage du gain hydrique des vêtements de corps (N=10).....	48
Tableau 14.	Résultats statistiques du pourcentage du gain hydrique des VIP (N=10)	49
Tableau 15.	Résultats statistiques de l'appréciation du mouvement de test de flexion vers l'avant (N=10).....	50

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Présentation de la veste contenant les MCP dans l'étude de Marchand et al., 2015.....	14
Figure 2.	Construction à trois couches du VIP pour les pompiers.	15
Figure 3.	Design Traditionnel : vue de face (gauche) et de dos (droite)	20
Figure 4.	Design Innovateur : vue de face (gauche) et de dos (droite)	20
Figure 5.	Vue intérieure d'un VIP équipé du système d'aération	23
Figure 6.	Vue d'un participant instrumenté et de l'équipement à l'intérieur de la chambre climatique.....	27
Figure 7.	Système utilisé pour les mesures de la consommation d'oxygène (à gauche) et un exemple de résultats obtenus pour un participant lors d'un test (à droite).....	28
Figure 8.	Système utilisé pour les mesures de la température interne (à gauche) et un exemple de résultats obtenus pour un participant lors d'un test (à droite)	28
Figure 9.	Système utilisé pour les mesures de la fréquence cardiaque (à gauche) et un exemple de résultats obtenus pour un participant lors d'un test (à droite)	29
Figure 10.	Capteur de température et d'humidité à l'intérieur du vêtement situé dans la couche interne	30
Figure 11.	Capteur de température et d'humidité à l'intérieur du vêtement situé dans la couche externe	30
Figure 12.	Exemple de résultats obtenus pour la température (en haut) et l'humidité relative (en bas) pour un participant lors d'un test	31
Figure 13.	Illustration des niveaux de perception de l'effort selon l'échelle de Borg 6-20 présenté sur un panneau situé devant le tapis roulant.....	32
Figure 14.	Représentation des mouvements pour les tests d'appréciations subjectives du confort.....	34
Figure 15.	Appréciations psychophysiques moyennées selon les différentes conditions évaluées	37
Figure 16.	Battements de travail moyennés selon les différentes conditions évaluées.....	38
Figure 17.	Températures dans la couche interne du VIP moyennées selon les différentes conditions évaluées	40
Figure 18.	Températures dans la couche externe du VIP moyennées selon les différentes conditions évaluées	40

Figure 19.	Humidité dans la couche interne du VIP moyennées selon les différentes conditions évaluées	43
Figure 20.	Humidité dans la couche externe du VIP moyennées selon les différentes conditions évaluées	43
Figure 21.	Températures internes moyennées selon les différentes conditions évaluées	46
Figure 22.	Exemple d'une analyse de régression entre la consommation d'oxygène et fréquence cardiaque d'un participant lors du test de la VO ₂ max.....	60
Figure 23.	Exemple d'une grille psychophysique pour l'appréciation subjective du confort.....	63

LISTE DES ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS

Acronyme	Définition
ACSM	American College of Sports Medicine
ANOVA	Analyse de la variance
APRA	Appareil de protection respiratoire autonome
ASTM	American Society for Testing and Materials
Bpm	Battements par minute
CNESST	Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail
CTT	Centre de technologie textile
CO ₂	Dioxyde de carbone (ppm)
EPI	Équipement de protection individuelle
FC	Fréquence cardiaque (battements/minute)
HR	Humidité relative (%)
IRSST	Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail
ISO	International organization for standardization
MCP	Matériau à changement de phase
NFPA	National Fire Protection Association
O ₂	Oxygène (ppm)
QAAP	Questionnaire sur l'aptitude à l'activité physique
RR	Intervalle entre deux battements cardiaques
SPSS	Statistical Product and Service Solutions
UQAM	Université du Québec à Montréal
VIP	Vêtement individuel de protection
VO ₂	Consommation d'oxygène (ml/min)
VO ₂ max	Consommation maximale d'oxygène (ml/min)

INTRODUCTION

Les contraintes thermiques et physiologiques sont associées à un risque accru d'événements cardiovasculaires, qui représentent la cause la plus fréquente de décès chez les pompiers (Smith, DeBlois *et al.*, 2016; Smith, Petruzzello *et al.*, 1997). Aux États-Unis, on rapporte que le nombre de pompiers décédés dans l'exercice de leurs fonctions a été, selon les études et les critères d'inclusion, de 62 à 102 par année depuis les dix dernières années (Fahy et Petrillo, 2022, Fahy *et al.*, 2017; U.S. USFA, 2017; USFA, 2020). L'événement cardiovasculaire associé à l'exténuation (overexertion/stress) est lié à 36 % à 57 % des décès (Fahy *et al.*, 2017; Fahy et Petrillo, 2022; USFA, 2017; USFA, 2021). Si la situation est la même au Québec, on devrait observer, en moyenne, environ un pompier par année qui décède en raison d'un événement cardiovasculaire. Or, les données d'indemnisation de la CNESST (2020) indiquent 35 cas de lésions professionnelles acceptées liées au coup de chaleur (effet de la chaleur, insolation, syncope due à la chaleur), mais aucun décès lié à un événement cardiovasculaire en 10 ans (2005 à 2014).

Il est probable que les données disponibles au Québec ne permettent pas d'évaluer l'ampleur de cette problématique en raison de la législation et des difficultés à bien coder ce type de lésion. En effet, les blessures qui résultent d'une exposition aux substances chimiques, d'une exposition aux températures extrêmes ou d'accidents de feu et d'explosion sont classées dans la catégorie « accident traumatique » dans les rapports de recherche de l'IRSST basés sur les données de la CNESST (Busque *et al.*, 2020). Il n'y a donc pas de recensement avec les causes exactes de décès chez les pompiers, puisque cette classe comprend aussi d'autres événements tels que les chutes ou le fait d'être écrasé par un équipement. Au Manitoba, une lésion cardiaque subie par un pompier dans les 24 heures suivant une intervention d'urgence est présumée être un accident de travail depuis 2005 (AWCBC, 2011). Aux États-Unis, la législation inclut depuis plusieurs années la présomption que les lésions cardiovasculaires peuvent être liées à la lutte contre les incendies (IDSP, 1994).

Les pompiers doivent réaliser de nombreuses tâches physiques très exigeantes avec leur vêtement et leurs équipements de protection individuelle (EPI) (Carballo-Leyenda *et al.*, 2017; Faff et Tutak, 1989). En effet, leur vêtement et EPIs (casque, bottes, appareil de protection respiratoire autonome, etc.) sont très lourds et affectent la liberté de mouvement, ce qui augmente l'effort physique. Leur vêtement limite aussi les échanges vers l'environnement extérieur, créant un microclimat propice à l'accumulation de chaleur et d'humidité dans le vêtement. D'autres éléments externes, tels que la chaleur des flammes, sont très exigeants physiquement et psychologiquement (Smith, Petruzzello *et al.*, 1997; von Heimbürg *et al.*, 2006). Ces efforts causent des adaptations physiologiques qui peuvent être dangereuses pour la santé des pompiers (Griefahn *et al.*, 2003). L'étude de Smith, DeBlois *et al.* (2016) indique qu'environ 45 % à 50 % des décès chez les pompiers sont dus à des arrêts cardiaques soudains, qui surviennent le plus souvent

pendant ou peu après l'exercice de leurs fonctions. Lors d'une intervention sur les lieux d'un incendie, plusieurs facteurs augmentent la charge cardiaque des pompiers : le stress associé à la situation d'urgence augmente la réponse du système nerveux, les efforts physiques qui sollicitent des masses musculaires importantes, et les vêtements individuels de protections qui augmentent les contraintes thermiques déjà très présentes lorsque les pompiers s'approchent des flammes. La lutte contre les incendies engendre des risques directs d'exposition à des températures extrêmes et à l'inhalation de produits chimiques. Les vêtements individuels de protection (VIP) des pompiers sont conçus dans l'intérêt de diminuer ces risques auxquels ils sont soumis, mais apportent des désavantages tels que la présence de chaleur et d'humidité à l'intérieur de leurs vêtements (Atalay *et al.*, 2015; Faff et Tutak, 1989).

Pour réduire l'exposition aux contraintes thermiques causées par le port des VIP, plusieurs innovations technologiques ont été proposées et évaluées (Carballo-Leyenda *et al.*, 2017; Marchand *et al.*, 2015; Yeargin *et al.*, 2016). Parmi les propositions des dernières années, les systèmes de refroidissement constitués de matériaux à changement de phase (MCP) semblent être une avenue intéressante pour réduire les contraintes thermiques à l'intérieur du VIP sans trop augmenter la masse du vêtement. À l'heure actuelle, ces systèmes de refroidissement ne sont pas intégrés aux vêtements, probablement à cause des problèmes de gestion de ce type de matériel qui complique l'organisation du travail dans les casernes. Par conséquent, la réduction des contraintes exercées par les VIP doit d'abord passer par une amélioration des matériaux utilisés dans leur confection.

La présente recherche a évalué l'impact et l'efficacité d'une nouvelle membrane barrière pour réduire les contraintes thermophysiques par rapport à une autre membrane existante sur le marché. Cette nouvelle membrane devait permettre d'optimiser la perméabilité à la vapeur d'eau et le transfert de chaleur produite par le corps lors des situations d'efforts physiques modérés. Cette optimisation permettrait de diminuer la température et de retarder l'augmentation de l'humidité relative à l'intérieur du VIP. Cette recherche a aussi évalué la performance d'un système d'aération permettant la circulation d'air dans la section dorsale du VIP. Finalement, elle a évalué la performance de deux designs de VIP différents, non seulement en termes de diminution des contraintes thermophysiques, mais également en termes d'aisance ressentie lors de la réalisation de mouvements contrôlés. Comme les contraintes thermophysiques peuvent être dangereuses pour les pompiers lors des interventions, il est pertinent de valider les innovations en matière de développement de nouveaux matériaux tels que les membranes barrières et les nouveaux designs. L'utilisation de tests comparatifs en environnement contrôlé permet d'isoler les effets qui sont uniquement attribuables aux différentes technologies utilisées pour la confection des VIP et de quantifier leur impact pour les concepteurs et les futurs utilisateurs.

1. ÉTAT DES CONNAISSANCES

1.1 Microclimat à l'intérieur des VIP

L'emprisonnement de la sueur à l'intérieur du VIP et la création d'un microclimat est une problématique majeure, puisque le processus de thermorégulation ne peut être effectué normalement. L'augmentation de la température corporelle interne peut apporter des risques immédiats pour la santé des pompiers associés aux contraintes thermiques. Ces conditions se traduisent parfois par une incapacité à évacuer la chaleur corporelle pour conserver un équilibre thermique, ce qui entraîne des « troubles liés à la contrainte thermique en ambiance chaude » (ISO 14505-3:2006). Les plus courants sont les crampes de chaleur, la syncope et le coup de chaleur, en ordre croissant de sévérité. Le coup de chaleur se caractérise par une défaillance de la thermorégulation due à une contrainte thermique trop importante (Brinquin et Buffat, 1994; Kenny et Flouris, 2014; Malchaire, 2004). Dans cette situation, la défaillance de la thermorégulation entraîne l'augmentation de la température corporelle interne qui, à son tour, accroît la vitesse du métabolisme et ainsi, la production de chaleur. Les trois signes caractéristiques du coup de chaleur sont : une peau chaude et sèche due à l'arrêt de la sudation, une température corporelle interne supérieure à 40 °C et des signes neurologiques sévères incluant agitation, propos incohérents, délire, convulsion, coma.

Le port du VIP limite considérablement les échanges thermiques avec l'environnement. Ce sont les processus de conduction, de convection, de rayonnement et d'évaporation qui permettent ces échanges de chaleur avec l'environnement (Lim *et al.*, 2008). Chez l'humain, la conduction et le rayonnement se font uniquement par la surface de la peau, alors que la convection et l'évaporation se font par les voies respiratoires et la surface de la peau (Cramer et Jay, 2019; Kenny et Flouris, 2014). Par ailleurs, cet équilibre est influencé par les paramètres environnementaux tels que la température ambiante, l'humidité, la vitesse de l'air et le rayonnement solaire, ainsi que des paramètres externes tels que la production de chaleur métabolique et le type de vêtements portés (Périard *et al.*, 2021).

Lors d'un échange thermique, la conduction se fait par contact direct, la convection est engendrée suite au mouvement des fluides tels que de l'eau ou de l'air, alors que le rayonnement représente toutes les ondes électromagnétiques (Périard *et al.*, 2021). La conduction et la convection entraînent un gain de chaleur si l'air ambiant est plus chaud que le corps ou une perte de chaleur si la surface du corps est plus chaude que l'air ambiant (Atha, 2013). À l'exception d'exposition prolongée à des objets plus chauds ou plus froids que la température de la peau, la conduction est majoritairement négligeable (Cramer et Jay, 2019; Gauer et Meyers, 2019; Kenny et Flouris, 2014). Quant à l'évaporation, elle se fait par la vaporisation de la sueur ou de l'eau (Périard *et al.*, 2021). Ce type d'échange est unidirectionnel, c'est-à-dire qu'il se fait de la surface de la peau vers l'environnement (Lim *et al.*, 2008). Pour qu'il y ait refroidissement de la peau par

l'évaporation, la sueur doit passer de liquide à vapeur (Gauer et Meyers, 2019; Wright *et al.*, 2013). Lors de la lutte contre les incendies, l'échange thermique de la peau vers l'environnement par le rayonnement, la convection et la conduction sont limitées par la chaleur environnante plus élevée. Le port du VIP limite d'autant plus la libération de chaleur par convection due à la création d'un microclimat à l'intérieur du vêtement. La libération de la chaleur métabolique se fait alors uniquement par l'évaporation de la sueur qui est déjà perturbée par la présence d'un pourcentage d'humidité relative très élevé dans la couche interne du VIP (Fontana *et al.*, 2016).

La production de chaleur par le corps humain est affectée par la durée et l'intensité de l'effort musculaire fourni (Lim *et al.*, 2008). La production de chaleur à l'effort augmente la température corporelle interne, comme le fait également la chaleur environnante si la température ambiante est supérieure à la température de la peau (Bouchama *et al.*, 2022). En réponse à la chaleur ambiante extrême ou à la chaleur produite par la contraction musculaire, des réponses thermorégulatrices sont enclenchées (Bouchama *et al.*, 2022). Lorsqu'il y a augmentation de la température interne du corps, les thermorécepteurs centraux et périphériques envoient l'information vers l'hypothalamus (Gleeson, 1998). Les thermorécepteurs périphériques se trouvent au niveau cutané et dans d'autres organes tels que le tube digestif (Romanovsky, 2007; Schlader et Vargas, 2019). Les thermorécepteurs situés dans l'hypothalamus détectent les augmentations de la température interne du corps, alors que le cerveau reçoit les informations sensorielles des thermorécepteurs cutanés (Gleeson, 1998). La région hypothalamique préoptique du cerveau interprète et traite cette information permettant de déclencher des réponses appropriées (Atha, 2013; Baker, 2017; Romanovsky, 2007). L'hypothalamus active les récepteurs de la peau et des organes viscéraux pour faciliter la perte de chaleur et maintenir une température interne normale (Gauer et Meyers, 2019). Dans le cas d'une augmentation de la température corporelle interne, la réponse motrice sera la transpiration et la vasodilatation cutanée, permettant la dissipation de la chaleur (Baker, 2017; Gleeson, 1998).

L'évaporation de la transpiration est principalement limitée par l'humidité emprisonnée à l'intérieur du VIP, ce qui contribue à l'augmentation de la température de la peau, de la température corporelle interne et de la fréquence cardiaque (Sköldström, 1987). L'astreinte thermique se produit généralement en raison de cette défaillance de la thermorégulation pour maintenir la température interne du corps dans ses limites (Parsons, 2014). Cette astreinte thermique n'est causée par aucun problème de santé, mais résulte d'une combinaison de divers facteurs tels que la génération de chaleur métabolique supplémentaire à l'intérieur du corps pendant l'exercice, l'exposition prolongée à un environnement thermique hostile (température de l'air près de la peau et humidité relative élevées) qui réduit l'évaporation de la sueur (Kenny et Flouris, 2014). Même avec une charge de travail équivalente à seulement 40 % de la consommation maximale d'oxygène (VO_2 max) des pompiers participants, l'étude de Marchand *et al.* (2006) a démontré que la charge cardiaque augmentait de 70 % après 20 minutes de

marche sur un tapis roulant avec le port d'un VIP. Contrairement au test en tenue sportive où la fréquence cardiaque se stabilisait après quelques minutes, le port du VIP a conduit plusieurs pompiers à la limite de 85 % de leur fréquence cardiaque maximale après seulement 20 minutes d'effort. Le dépassement de cette valeur constituait l'un des critères d'arrêt du test.

D'autres recherches réalisées lors d'interventions ou de simulations en laboratoire ont aussi démontré l'importance des contraintes physiques et physiologiques auxquelles sont soumis les pompiers (Faff et Tutak, 1989; Holmér et Gavhed, 2007; Smith, Petruzzello *et al.*, 1997; von Heimburg *et al.*, 2006; Williams-Bell *et al.*, 2010). Ces recherches s'entendent sur le fait que le travail des pompiers est exigeant pour le système cardiorespiratoire, car il implique des efforts physiques importants (p. ex. la masse des outils manutentionnés, le port d'un appareil de protection respiratoire autonome relativement lourd, la montée des échelles, le transport des victimes, etc.) dans des conditions de chaleur ambiante très élevée avec un vêtement de protection qui augmente les contraintes thermiques. Sköldstrom (1987) a lui aussi démontré que la contrainte imposée par le travail à la chaleur avec le port d'un VIP est plus grande que celle imposée par le travail à 35 °C en tenue sportive, et que cette augmentation serait principalement attribuable à la masse des VIP et à leurs propriétés isolantes et imperméables.

Pour Atalay *et al.*, 2015, la protection thermique des pompiers serait également affectée par la quantité et la répartition d'humidité relative à l'intérieur du vêtement, par la conception des vêtements et les types de matériaux utilisés, ainsi que par le niveau d'intensité thermique auquel les pompiers sont exposés. L'humidité accumulée sur la peau et dans les couches de tissu peut altérer le niveau de protection. Lawson *et al.* (2004) ont démontré que l'humidité accumulée dans les vêtements a des effets sur leur performance de protection thermique en augmentant les risques de brûlures par conduction.

Plusieurs recherches ont déjà été menées pour valider des solutions visant à réduire les contraintes thermiques chez les travailleurs exposés à des chaleurs extrêmes. Une recherche financée par l'IRSST (Marchand *et al.*, 2015) avait démontré la pertinence d'évaluer la performance de nouveaux matériaux développés dans le but d'améliorer l'efficacité de la thermorégulation lors du travail en ambiance chaude. Dans ce cas, les deux volets de l'étude avaient permis d'étudier l'efficacité d'une veste refroidissante à base de matériaux à changement de phase (MCP) portée sous un habit de pompier (un prototype de veste pour le volet 1 et un prototype amélioré de la veste pour le volet 2), et l'efficacité d'un nouveau matériau double densité (volet 2), utilisé comme doublure thermique dans la confection d'un habit de pompier. L'étude avait démontré que l'introduction d'une veste refroidissante à base de MCP dans les VIP avait permis une réduction significative des astreintes thermiques, notamment lorsque la veste assurait un transfert thermique optimal avec la peau de l'utilisateur, comme c'était le cas pour le prototype confectionné à partir de fibres de bambou (prototype amélioré du volet 2 de l'étude) présenté à la Figure 1. Cette recherche avait également montré que,

contrairement à ce qui était attendu, le VIP à double densité semblait créer un effet d'isolation plus important que celui du VIP standard. Sans l'utilisation de la veste refroidissante, cette isolation avait un effet négatif sur le confort en conservant davantage de chaleur à l'intérieur du VIP. Le VIP à double densité devenait avantageux seulement lorsque la veste refroidissante du prototype amélioré était portée dans cet habit, parce qu'il permettait de conserver l'effet refroidissant des MCP à l'intérieur du VIP et ainsi de maintenir une température corporelle interne basse. Le constat des dernières années est que les systèmes de refroidissement ne sont pas encore intégrés aux vêtements des pompiers, et ce, principalement à cause de problèmes associés à l'organisation du travail. Les MCP doivent être maintenus dans un endroit réfrigéré avant l'utilisation, ce qui cause une étape supplémentaire au moment de mettre le VIP.

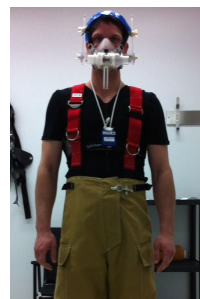
En réponse au défi que pose l'exposition des pompiers aux conditions sévères de contraintes thermiques, il est important de développer des technologies qui n'occasionnent pas de changement dans l'organisation du travail. Une des solutions consiste à améliorer les matériaux impliqués dans la fabrication des VIP.



Pochette de sels hydratés
ignifuges, constituants le MCP



46 pochettes de MCP intégrées
dans la veste



Veste portée directement
sur le corps

Figure 1. Présentation de la veste contenant les MCP dans l'étude de Marchand et al., 2015

1.2 Amélioration de la membrane barrière et du design des VIP

Le VIP pour les pompiers est constitué de plusieurs couches de matériaux. En Amérique du Nord, la construction du VIP doit inclure une coque extérieure, une barrière contre l'humidité et un revêtement thermique (NFPA, 1971, 2018), comme présentée à la Figure 2.

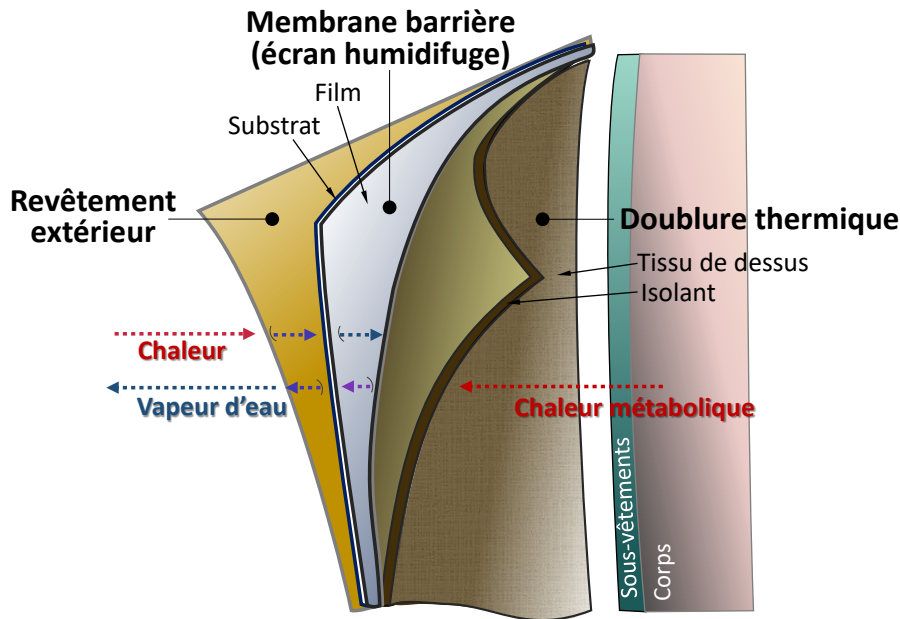


Figure 2. Construction à trois couches du VIP pour les pompiers. Adapté de « Honeywell First Responder Products : Berry Amendment Compliant Fabric Selector Guide », par Honeywell, 2014, page 15 (<https://prod-edam.honeywell.com/content/dam/honeywell-edam/sps/his/en-us/products/protective-clothing/documents/hfr-berry-fabric.pdf?download=false>). ©Honeywell, 2014.

Chaque matériau a un rôle très spécifique :

- Le revêtement extérieur ou coque extérieure (*outer shell*) est la première couche de protection. Généralement produite à partir de fibres tissées, elle fournit la résistance aux flammes, la résistance thermique et la résistance mécanique (aux coupures, aux accrocs, aux perforations, aux déchirures et à l'abrasion).
- La membrane barrière, aussi appelée écran humidifuge ou membrane coupe-vapeur (*moisture barrier*), constitue la couche intermédiaire du VIP. Elle est formée d'un film résistant à l'humidité et perméable à l'air qui est laminé sur un substrat pour plus de stabilité. Elle assure la protection, tant du pompier que de la doublure thermique du VIP, à l'eau, à la vapeur d'eau près du point d'ébullition, à la pénétration d'humidité, à la pénétration de produits chimiques liquides et d'agents pathogènes. La membrane barrière permet également le passage vers l'extérieur de la vapeur d'eau qui s'échappe du corps afin que l'évaporation de la sueur puisse se faire à travers les micropores de la membrane, puis du revêtement extérieur, afin de favoriser un refroidissement efficace du corps (Holmes, 2000).

- La doublure thermique (*thermal liner*) est constituée de matériaux non tissés, thermiquement isolants, ignifuges, qui sont fixés à un matériau tissé pour la stabilité et la résistance. Cette doublure isole le pompier des effets de la chaleur extrême rencontrée lors des opérations de lutte contre l'incendie.

Bien qu'essentielle pour se protéger des flammes, la présence de ces matériaux limite l'évacuation de l'humidité du corps et empêche alors un refroidissement efficace par évaporation. Les résultats de l'étude comparative de Jung-Hyun *et al.* (2014) démontrent que les matériaux qui assurent une meilleure perméabilité à l'humidité produite par le corps, lors d'une activité physique intense, permettent une réduction significative de la température interne du corps et du rythme cardiaque. Ces matériaux apportent des bénéfices physiologiques pour réduire la contrainte thermique imposée par le port des VIP.

Le Groupe CTT (Centre collégial de transfert de technologie du Cégep de Saint-Hyacinthe) et ses partenaires industriels réalisent depuis plusieurs années de la recherche appliquée dans le domaine des textiles techniques et des matériaux avancés à base de textile. Actuellement, les manufacturiers de membrane barrière préconisent l'utilisation d'une membrane microporeuse à base de ePTFE (polytétrafluoroéthylène expansé) sur laquelle est appliquée une couche continue, non poreuse, à base d'uréthane qui protège les micropores contre l'occlusion par des saletés, des particules de savons et des particules de sel. La membrane barrière microporeuse doit être laminée à un matériel de support pour lui conférer des propriétés mécaniques suffisantes. Ce support peut être constitué d'un tissu, d'un tricot ou bien encore d'un non-tissé traditionnellement fait de fibres aramides ignifuges, puis laminé à l'aide d'une formulation d'adhésifs. Le Groupe CTT et ses partenaires industriels sont d'avis que les propriétés de perméabilité à la vapeur d'eau et de transfert de chaleur peuvent être améliorées en optimisant les formulations à base d'uréthane appliquées et le traitement de la surface de la membrane microporeuse. De plus, le type de textile qui sert de support à la membrane devrait également avoir une influence sur les performances de transfert de vapeur d'eau et de chaleur.

Dans ce contexte, une nouvelle membrane barrière a été développée pour la confection d'habits de pompier. Ce développement s'est fait dans le respect des exigences de la norme NFPA 1971 (2018) qui établit les niveaux minimaux de protection contre l'exposition aux agresseurs thermiques, physiques et environnementaux, et aux pathogènes hématologiques rencontrés lors d'incendies, et à laquelle les habits de pompier utilisés en Amérique du Nord doivent se conformer. Les résultats de ce prototype indiquent que des progrès ont été obtenus à l'égard des propriétés de respirabilité des membranes, notamment les propriétés de résistance évaporative (R_{et}) selon la méthode ISO 11092:2014. En effet, le prototype de membrane qui a reçu un traitement de surface spécifique et dont le support textile est plus léger (résultant en une membrane de 143 ± 7 g/m² comparativement à la membrane de base chez le même manufacturier de $190 \pm$

13 g/m²) a obtenu une plus faible résistance évaporative avec un R_{et} de 4,13 m²·Pa/W, comparativement à 14,2 m²·Pa/W pour la même membrane sans traitement de surface.

La conception du VIP pour les pompiers joue également un rôle dans l'astreinte thermique, tant par les matériaux qui composent le VIP, que par le design du VIP. En effet, des recherches ont montré que le design des VIP a un impact sur la mobilité articulaire et les contraintes mécaniques (Coca *et al.*, 2010; Marchand *et al.*, 2006). Entre autres, une recherche précédente financée par l'IRSST (Marchand *et al.*, 2006) mentionnait que les VIP devraient être conçus de façon à offrir le plus de liberté de mouvement possible au niveau des articulations (genoux, hanches, épaules et coudes) et que la superposition de matériaux entre le manteau et le pantalon au niveau de la hanche pourrait augmenter les contraintes mécaniques imposées aux muscles responsables de la flexion de la hanche. Un nouveau design de VIP évalué dans la présente recherche semblait avoir pris en compte plusieurs de ces considérations ergonomiques. Selon le fabricant du VIP, le design propose une mobilité supérieure pour les épaules et la ceinture scapulaire. La coupe arrondie de la partie inférieure du manteau limite le chevauchement avec le pantalon. Le design du pantalon pour l'entrejambe et les genoux offre une meilleure mobilité pour les mouvements de la hanche et du genou. L'innovation la plus intéressante semble être un système tridimensionnel d'aération qui crée des espaces (canaux d'aération) dans la section dorsale du manteau. Cette innovation favoriserait la circulation de l'air dans la zone habituellement étanche créée par le port de la bonbonne du système de protection respiratoire, aidant ainsi à limiter la transpiration dans le dos.

2. OBJECTIFS

L'objectif de cette recherche était d'évaluer l'effet des nouvelles technologies de conception des VIP sur la réponse physiologique des participants portant les VIP dans un environnement contrôlé. L'amélioration des propriétés de la membrane barrière, le changement de design du VIP et l'ajout d'un système d'aération dans la section dorsale du VIP devraient réduire les contraintes physiologiques lors d'un effort physique standardisé sur tapis roulant.

Plus spécifiquement, l'étude visait à vérifier les trois hypothèses suivantes :

- La nouvelle membrane barrière devrait améliorer la perméabilité à la vapeur d'eau et permettre le transfert de chaleur produite par le corps vers l'extérieur du VIP lors des situations d'efforts physiques contrôlés, comparativement à une autre membrane disponible sur le marché. Une baisse de l'humidité relative à l'intérieur du VIP devrait entraîner une diminution de la température interne du corps, de la fréquence cardiaque, de la température et de l'humidité relative à l'intérieur du VIP.
- Le nouveau design de VIP devrait offrir plus de liberté de mouvement au niveau des articulations (genoux, hanches, épaules et cou), réduisant ainsi les contraintes mécaniques imposées à plusieurs muscles, ce qui devrait réduire la charge physique imposée par le VIP et améliorer la réponse physiologique. Ces changements

devraient améliorer le confort des utilisateurs lors de la réalisation des mouvements standardisés et réduire la consommation d'oxygène durant le test sur le tapis roulant.

- Le nouveau système d'aération devrait permettre une meilleure circulation de l'air dans la section dorsale de la couche interne du VIP, ce qui devrait réduire la température et l'humidité relative à l'intérieur du VIP.

3. MÉTHODOLOGIE

3.1 Participants et critères d'inclusion

Dix participants masculins ont été recrutés sur une base volontaire pour chacun des trois volets de ce projet de recherche. Ils étaient inscrits au programme des sciences de l'activité physique de l'Université du Québec à Montréal (UQAM). Le tableau 1 présente leurs principales caractéristiques. Ces participants étaient en mesure de réaliser les tests expérimentaux, lesquels exigeaient un effort physique de marche sur un tapis roulant, mais ne requéraient aucune expérience de travail particulière. Ils n'avaient d'ailleurs aucune expérience de travail avec le port d'un VIP. Cette situation avait l'avantage d'assurer un jugement plus neutre lors de l'évaluation subjective des VIP pour l'étude. Le recrutement était ouvert seulement aux hommes pour éviter de mesurer des variations de la température interne qui sont présentes durant le cycle menstruel chez les femmes (Somboonwong *et al.*, 2015). Les participants étaient non-fumeurs et ils devaient remplir le questionnaire sur l'aptitude à l'activité physique (QAAP) afin de s'assurer de leur état de santé (Warburton *et al.*, 2011). Ils devaient se soumettre à un test progressif d'estimation du VO_2 max sur tapis roulant et obtenir un résultat se situant entre 35 et 65 ml/kg/min.

Le test de prédiction sous-maximal du VO_2 max utilisé était le test à la marche de Balke (Balke et Ware, 1959) sur tapis roulant. Selon le principe de la spécificité, pour bien mesurer la capacité cardiorespiratoire, le test de prédiction sous maximale du VO_2 max devait être réalisé dans des conditions s'approchant le plus possible de celles retenues par les tests choisis pour l'étude (Wilmore *et al.*, 2009). La valeur du VO_2 max a été extrapolée à partir d'un test de prédiction sous-maximal jusqu'à 85 % de la fréquence cardiaque maximale afin d'éviter des problèmes de santé pour le participant (Scherrer, 1981). Les détails du test utilisé sont présentés à l'annexe A.

À noter que tous les participants de cette étude ont terminé l'intégralité des expérimentations qui leur étaient demandées.

Tableau 1. Caractéristiques des participants

Participants	Âge	Taille (cm)	Poids (kg)	VO ₂ max (ml/kg/min)
1	28	181,4	98,08	35,38
2	24	187,9	106,00	53,49
3	25	179,5	83,90	58,92
4	24	175,0	77,50	50,92
5	28	176,6	67,28	57,80
6	23	178,6	65,74	45,18
7	24	181,0	77,58	46,67
8	28	178,2	75,46	38,13
9	26	187,5	108,16	42,75
10	22	190,7	83,58	36,78

3.2 Caractéristiques des VIP (variables indépendantes étudiées)

3.2.1 Deux designs d'habits

Deux designs de VIP ont été utilisés dans cette étude. Le design dit « Traditionnel » (Figure 3) est une conception de base qui a été développée depuis plusieurs années pour assurer une liberté de mouvement durant les activités de travail des pompiers. Le design Traditionnel comprend :

- Pour le manteau :
 - un soufflet sous les bras pour une liberté de mouvement accrue
 - un soufflet rétractable au dos (vis-à-vis les épaules) pour une bonne mobilité et un confort à la ceinture scapulaire.
- Pour le pantalon :
 - un design des genoux à mobilité accrue, pour donner une bonne amplitude des mouvements à l'articulation des genoux.

Le design dit « Innovateur » (Figure 4) offre globalement les mêmes fonctionnalités que le design Traditionnel (nombre et positionnement des poches, système de fermeture du manteau et du pantalon, position des bandes réfléchissantes, matelassage aux genoux). Le design Innovateur a été conçu pour améliorer le confort, la liberté de mouvement aux articulations des membres inférieurs et supérieurs, et la durabilité du VIP. À la différence du design Traditionnel, le design Innovateur offre les éléments de conception suivants :

- Pour le manteau :
 - des épaules sans couture sur le tissu extérieur, pour améliorer la mobilité et le confort aux épaules et à la ceinture scapulaire
 - la partie avant du manteau plus élevée et le dos plus allongé avec une coupe arrondie, pour limiter le chevauchement avec le pantalon
 - un panneau arrière rétractable (au centre du dos), pour ajouter de la largeur au dos, au besoin, et ainsi augmenter la mobilité et le confort
 - un collet à hauteur variable (bas à l'avant et plus haut à l'arrière), pour offrir une mobilité améliorée de la tête et un meilleur confort.
- Pour le pantalon :
 - une taille basse avec ceinture, pour que le pantalon puisse être utilisé avec ou sans les bretelles
 - une fourche (entrejambe) pour offrir une meilleure liberté des mouvements de la hanche
 - un design optimisé des genoux pour améliorer la mobilité à l'articulation des genoux

Les matériaux qui composent ces VIP sont présentés au tableau 2.



Figure 3. Design Traditionnel : vue de face (gauche) et de dos (droite)



Figure 4. Design Innovateur : vue de face (gauche) et de dos (droite)

3.2.2 Deux membranes barrières

Deux membranes barrières ont été utilisées dans cette étude et intégrées dans les VIP de design Traditionnel et Innovateur. La membrane M1 est une membrane microporeuse à base de ePTFE et d'uréthane hydrophile de dernière génération, commercialisée pour le marché des habits de pompier. La membrane M2 consiste en un prototype à base de formulation différente de ePTFE et d'uréthane hydrophile ayant reçu des traitements de surface spécifiques et appliqué à un support textile composé d'un mélange de fibres Nomex® tissé. La résistance évaporative (R_{et} selon le test de la méthode ISO 11092:2014) obtenue pour la membrane M2 est plus faible ($4,13 \text{ m}^2 \cdot \text{Pa/W}$) comparativement à celle de la membrane M1 ($6,97 \text{ m}^2 \cdot \text{Pa/W}$). La membrane prototype M2 devrait favoriser l'évaporation de l'humidité relative dans la couche interne du VIP. Les matériaux spécifiques qui composent ces membranes barrières sont présentés au Tableau 2.

Il est à noter que les propriétés de perte de chaleur totale (THL pour *Total Heat Loss*) et de cote de performance de protection thermique contre le feu (TPP Rating pour *Thermal Protective Performance*) des différentes compositions d'habits, mesurées selon les méthodes indiquées dans la norme NFPA 1971 (2018), sont similaires :

- Coque extérieure + membrane barrière M1 + doublure thermique :
 - $\text{THL} = 269,1 \text{ W/m}^2$
 - TPP rating = 35
- Coque extérieure + membrane barrière M2 + doublure thermique :
 - $\text{THL} = 269,1 \text{ W/m}^2$
 - TPP rating = 39,2

Tableau 2. Caractéristiques des matériaux formant les VIP

Couche/matériaux	Composantes	Structure	Masse (onces/vg ² g/m ²)	Épaisseur (pouce)
Coque extérieure, designs Traditionnel et Innovateur	• 65 % Para-Aramid • 35 % Meta-Aramid • Finition hydrofuge durable	Tissage sergé	6,5 220,4	0,014
Membrane barrière M1	• Tissu de dessus ○ 5 % Para-Aramid ○ 93 % Meta-Aramid ○ 2 % Anti-Stat • Laminée sur un film propriétaire de ePTFE	Laminée	4,7 159,4	
Membrane barrière M2	• Tissu de dessus ○ Nomex® tissé • Laminée sur un film de ePTFE	Laminée	5,5 186,5	
Doublure thermique	• Tissu de dessus ○ 60 % filaments Nomex®/40 % filés ignifuges de Nomex® Lenzing^{MD} armure sergé • Isolant ○ 86 % Aramide/14 % Viscose résistant à la flamme • Tissu de dessus matelassé à une épaisseur de 2,3 oz/vg² et une épaisseur de 1,5 oz/vg² de tissu isolant non tissé.	Armure sergé matelassée à 2 épaisseurs de tissu isolant non tissé	7,4 250,9	0,05

3.2.3 Système d'aération

Le système d'aération est un système de coussinets tridimensionnels disposé à l'intérieur de la zone dorsale et des épaules du VIP qui forme des canaux d'aération (Figure 5). Fabriqué d'une maille robuste et d'une mousse alvéolée perforée étanche et légère, ce système permettrait à l'air de circuler à travers les canaux d'aération afin de réduire l'humidité emprisonnée dans la zone étanche créée dans le dos par le port de la bonbonne d'oxygène de l'appareil de protection respiratoire.



Figure 5. Vue intérieure d'un VIP équipé du système d'aération

3.3 Conditions expérimentales

3.3.1 Conditions de VIP

Le protocole expérimental comportait cinq conditions de VIP :

1. VIP design Traditionnel et membrane M1 (DT M1)
2. VIP design Traditionnel et membrane M2 (DT M2)
3. VIP design Innovateur et membrane M1 (DI M1)
4. VIP design Innovateur et membrane M2 (DI M2)
5. VIP design Innovateur et membrane M2 avec le système d'aération (DI M2 A)

Ce protocole a permis d'isoler expérimentalement les effets des différentes variables (deux designs, deux membranes barrières et un système d'aération).

Pour l'ensemble des conditions, les participants portaient sous le VIP un T-shirt fourni par l'expérimentateur et leur sous-vêtement personnel, ainsi que des espadrilles de course. Ils portaient aussi, par-dessus le VIP, le harnais de l'appareil de protection respiratoire individuelle autonome (APRIA) (sans la bonbonne d'O₂) afin de limiter la circulation de l'air

dans la partie dorsale du VIP comme le ferait justement ce support d'APRIA pour les pompiers en intervention.

Lors de leur première visite, les participants devaient passer un test d'évaluation de leur VO_2 max. Les deux visites suivantes étaient des prétests (Tableau 3) réalisés avec tout l'équipement afin de se familiariser avec le protocole expérimental et de s'acclimater à l'environnement de la chambre climatique. Cette précaution, recommandée dans la norme ASTM F2668-16, permettait de réduire l'influence du stress psychologique associé aux premières évaluations en laboratoire. Les visites suivantes servaient à l'évaluation des différentes conditions de VIP.

Bien que les sujets devaient suivre des consignes rigoureuses afin de se présenter en bonne forme physique la journée d'un test, il était important que les participants aient une période d'adaptation avec la chambre climatique et principalement avec l'appareil servant à la mesure de la consommation d'oxygène (VO_2). Lorsque l'horaire du participant le permettait, les visites étaient effectuées une fois par semaine, le même jour à la même heure. Dans les cas où plus d'une visite était effectuée dans la même semaine, les visites étaient faites au même moment de la journée, tout en s'assurant de respecter le 48 h de délai entre deux tests.

Tableau 3. Ordre de passation des tests pour les 10 participants

Participants	Visite 1	Visite 2	Visite 3	Visite 4	Visite 5	Visite 6	Visite 7	Visite 8
1	VO ₂ max	DT M1	DT M1	DT M2	DT M1	DI M1*	DI M2	DI M2 A
2		DI M2 A	DI M2 A	DI M2	DI M2 A*	DI M1	DT M2	DI M1
3		DT M2	DT M2	DI M1	DT M2	DI M2*	DI M2 A	DT M1
4		DT M1	DT M1	DI M2 A	DT M1*	DI M2	DI M1	DT M2
5		DI M1	DI M1	DI M2	DI M1	DI M2 A*	DT M1	DT M2
6		DT M2	DT M2	DT M1	DI M2*	DI M2 A	DI M2	DI M1
7		DI M2	DI M2	DI M2 A	DI M2	DT M1*	DT M2	DI M1
8		DI M1	DI M1	DT M2	DI M1*	DT M1	DI M2 A	DI M2
9		DI M2 A	DI M2 A	DT M1	DI M2 A	DT M2*	DI M1	DI M2
10		DI M2	DI M2	DI M1	DI M2*	DT M2	DT M1	DT M2 A

* Moment du lavage des VIP qui ont été utilisés lors de la visite courante et des visites antérieures.

Le Tableau 3 présente l'ordre des conditions expérimentales évaluées sur une période de 4 mois pour l'ensemble des participants. Les VIP ont été partagés par deux participants

aux caractéristiques physiques similaires. Les vêtements ont été nettoyés selon les spécifications du fabricant avant le début des essais (prélavage), ainsi qu'à mi-chemin du protocole expérimental, c.-à-d. que, au moment présenté par l'étoile (*) dans le Tableau 3, les VIP utilisés lors de la visite courante et des visites antérieures ont été nettoyés. Les participants n'ont reçu aucune information sur les caractéristiques des VIP pour ne pas influencer leur évaluation psychophysique à l'effort et leur appréciation subjective du confort lors de la réalisation des mouvements standardisés.

Les modifications apportées au design de l'habit du modèle Innovateur ont apporté un changement de masse de la coque extérieure. Le design Traditionnel était en moyenne 0,16 kg moins lourd que le design Innovateur (2,49 kg vs 2,65 kg) (Tableau 4).

Les modifications apportées à la membrane barrière et à l'ajout du système d'aération ont eu des effets sur la masse des VIP (Tableau 5). Le modèle Innovateur-M2 avec aération était en moyenne 0,16 kg plus lourd que le modèle Innovateur-M2 sans aération (4,50 kg vs 4,34 kg). La membrane M1 était en moyenne 0,04 kg plus lourde que la membrane M2 (pour les modèles Traditionnel : 4,24 kg avec M1 et 4,20 kg avec M2; pour les modèles Innovateur : 4,38 kg avec M1 et 4,34 kg avec M2).

Tableau 4. Masse de la coque extérieure des VIP

Design →	Traditionnel	Innovateur
VIP des participants	Masse (kg)	Masse (kg)
1 & 2	2,54	2,72
3 & 4	2,46	2,62
5 & 6	2,46	2,60
7 & 8	2,46	2,62
9 & 10	2,52	2,68
Moyenne	2,49	2,65

Tableau 5. Poids des cinq différentes conditions de VIP (kg)

Design →	Traditionnel		Innovateur		Innovateur aération
Membrane →	M1	M2	M1	M2	M2
VIP des participants	Masse (kg)	Masse (kg)	Masse (kg)	Masse (kg)	Masse (kg)
1 & 2	4,36	4,34	4,54	4,50	4,66
3 & 4	4,18	4,14	4,32	4,30	4,46
5 & 6	4,18	4,14	4,30	4,26	4,40
7 & 8	4,16	4,12	4,28	4,24	4,42
9 & 10	4,32	4,28	4,46	4,42	4,58
Moyenne	4,24	4,20	4,38	4,34	4,50

3.3.2 Conditions à l'effort et environnement de la chambre climatique

Le protocole expérimental était basé sur la méthode d'essai normalisée ASTM F2668-16 « *Determining the physiological responses of the wearer to protective clothing ensembles* », très similaire à la méthode d'essai ASTM F2300-10 (2022) utilisée dans une étude antérieure (Marchand *et al.*, 2015). Les essais se sont déroulés dans une chambre climatique (Figure 6) où la température était stable à 35 °C ($\pm 0,5$ °C) et l'humidité relative était maintenue à 50 % (± 5 %). Les tests sur le tapis roulant (modèle Pulsar 3p, h/p/cosmos), d'une durée maximale à l'effort de 45 minutes, étaient effectués à la vitesse de 5 km/h avec une pente qui permettait d'obtenir un effort physique correspondant à 30 % de la VO₂ max du participant en tenue de sport.



Figure 6. Vue d'un participant instrumenté et de l'équipement à l'intérieur de la chambre climatique

3.4 Variables physiologiques mesurées durant les tests sur le tapis roulant

Plusieurs variables ont été mesurées afin d'évaluer la réponse physiologique associée aux différentes conditions de VIP étudiées.

3.4.1 Consommation d'oxygène

La consommation d'oxygène (VO_2) a servi à quantifier les contraintes mécanique et énergétique exercées sur les systèmes musculaire et cardiorespiratoire à travers la mesure de la ventilation ainsi que la production d' O_2 et de CO_2 pour les différentes conditions de l'étude. Ces données ont été recueillies une fois toutes les 15 secondes à l'aide d'un analyseur métabolique (MOXUS modular VO_2 System, AEI Technologies) (Figure 7). Cette variable était principalement influencée par l'intensité du travail demandé au participant (vitesse et pente du tapis roulant), la masse des matériaux utilisés pour la confection du VIP ainsi que la malléabilité de ces derniers.

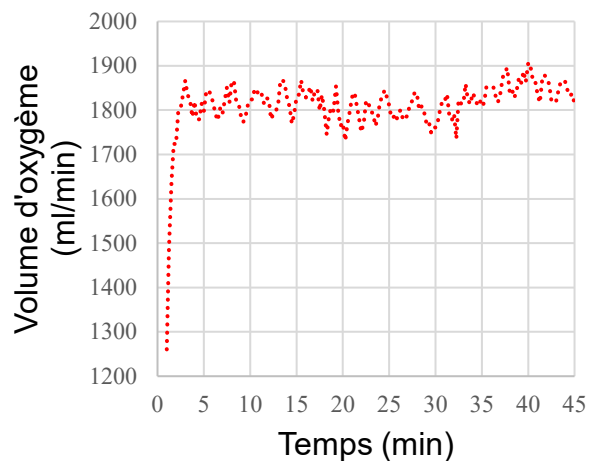
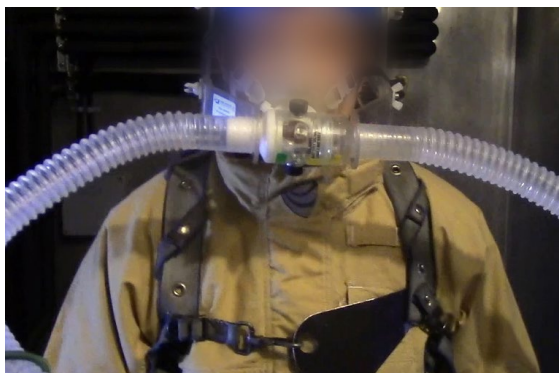


Figure 7. Système utilisé pour les mesures de la consommation d'oxygène (à gauche) et un exemple de résultats obtenus pour un participant lors d'un test (à droite)

3.4.2 Température corporelle interne

La température corporelle interne a été mesurée grâce à une sonde jetable (CorTemp Sensor de HQinc.) ingérée par les participants. Elle a fourni une lecture de la température centrale une fois toutes les 15 secondes avec une précision de $\pm 0,1$ °C. Les données ont été recueillies à l'aide de l'appareil CorTemp® Data Recorder de HQinc (Figure 8).

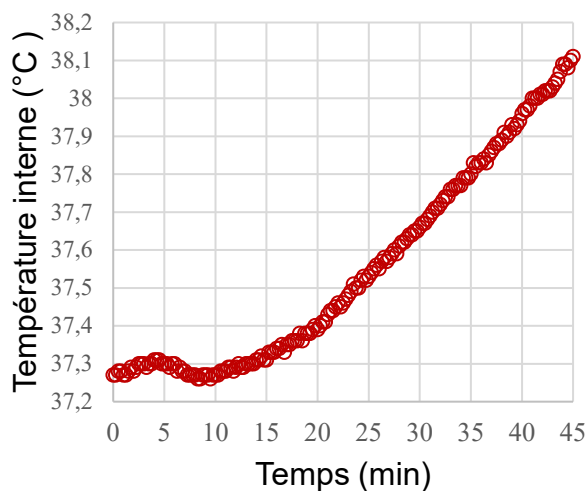


Figure 8. Système utilisé pour les mesures de la température interne (à gauche) et un exemple de résultats obtenus pour un participant lors d'un test (à droite)

3.4.3 Fréquence cardiaque

La fréquence cardiaque (FC) a été mesurée à partir de l'intervalle RR (temps qui sépare deux contractions ventriculaires) avec un cardiofréquencemètre (POLAR Model RS800) (Figure 9). La fonction principale de la fréquence cardiaque est d'augmenter le débit cardiaque afin de fournir l'oxygène nécessaire aux muscles actifs (Wilmore *et al.*, 2009). La FC a servi à observer l'effet de la contrainte thermique produit par l'environnement et le VIP. En effet, lorsqu'un travail physique est réalisé en ambiance chaude, la fréquence cardiaque va augmenter pour améliorer le débit sanguin cutané et abaisser la température interne du corps. Lorsque la température corporelle augmente, les besoins en thermorégulation s'ajoutent à ceux de la contrainte musculaire imposée par l'exercice et augmentent le rythme cardiaque pour assurer la perte de chaleur. La contrainte physiologique peut devenir encore plus pénible lorsque l'humidité relative est importante puisque la capacité de l'air ambiant à absorber de l'eau est diminuée et rend la perte de chaleur par évaporation de moins en moins efficace.

Afin de limiter les différences intra-individuelles liées au rythme basal, les données de fréquence cardiaque ont été analysées en termes de battement de travail qui tient compte de la fréquence de repos. Cette fréquence de repos était évaluée lors d'une période de repos de 5 minutes en position assise avant les tests sur tapis roulant.

$$\text{Battements de travail} = \text{FC lors de l'évaluation} - \text{FC de repos}$$

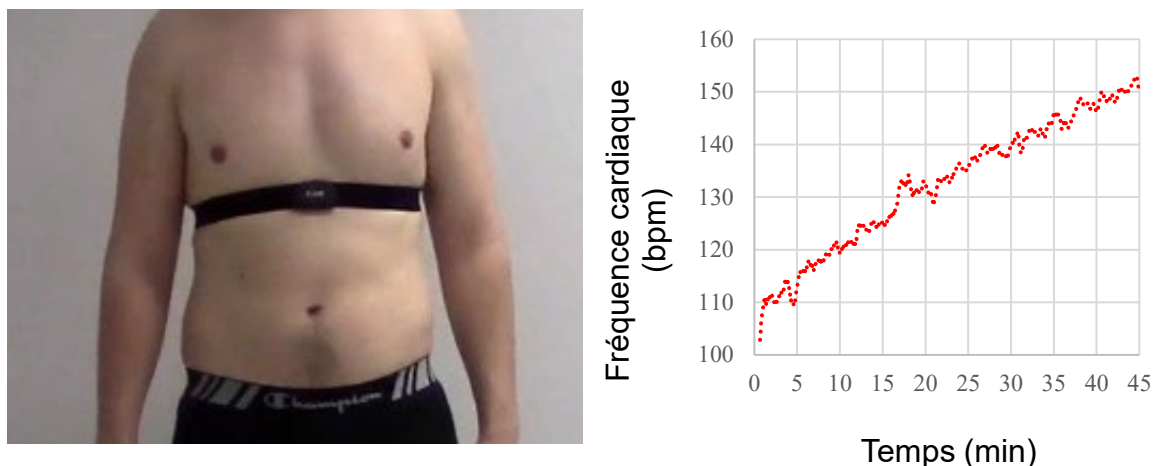


Figure 9. Système utilisé pour les mesures de la fréquence cardiaque (à gauche) et un exemple de résultats obtenus pour un participant lors d'un test (à droite)

3.4.4 Humidité relative et température à l'intérieur du VIP

Les mesures de l'humidité relative et de la température à l'intérieur du VIP ont été réalisées avec deux appareils Lascar EL-USB-2 (DATAQ Instruments), qui étaient placés à deux endroits différents :

- Dans la **couche interne** à l'intérieur de la doublure thermique (Figure 10).
- Dans la **couche externe** entre la membrane barrière et la coque extérieure (Figure 11).



Figure 10. Capteur de température et d'humidité à l'intérieur du vêtement situé dans la couche interne

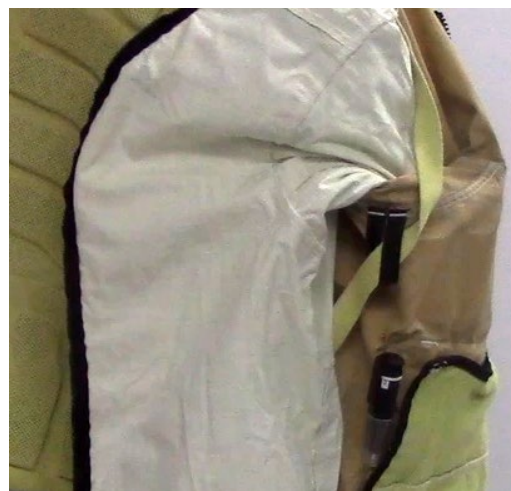


Figure 11. Capteur de température et d'humidité à l'intérieur du vêtement situé dans la couche externe

Cet appareil mesure l'humidité relative entre des valeurs de 10 à 95 % (précision de ± 4 %) et la température sur une échelle de -40 °C à 70 °C (précision de $\pm 0,6$ °C autour de 25 °C). Cet appareil prenait une lecture toutes les huit secondes, dont un exemple est présenté à la Figure 12. Les capteurs étaient placés derrière l'aisselle droite de façon à ne pas être compressé par le support de l'appareil respiratoire. Ils étaient installés sur le participant dans un environnement à 23 °C, avant que ce dernier entre dans la chambre climatique.

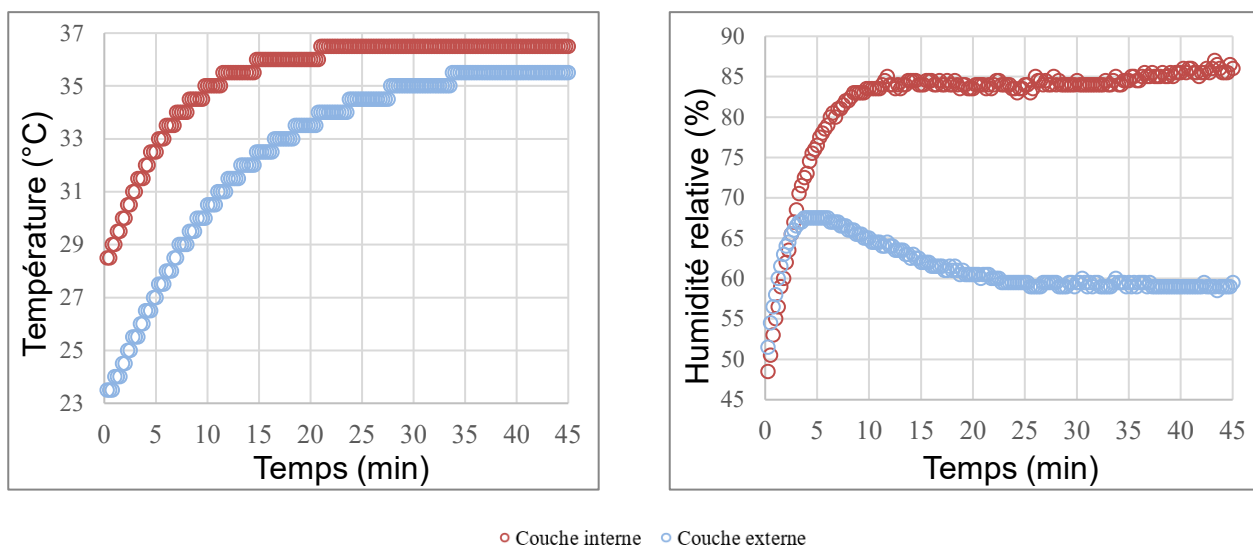


Figure 12. Exemple de résultats obtenus pour la température (en haut) et l'humidité relative (en bas) pour un participant lors d'un test

3.4.5 Perte hydrique

Durant les tests sur le tapis roulant, le participant perd de la masse par la sudation (perte hydrique du participant). La perte hydrique reste emprisonnée en partie dans les vêtements de corps du participant (le T-shirt et les chaussettes), et en partie dans le VIP (le manteau et le pantalon). Ainsi, les vêtements que le participant porte gagnent de la masse durant le test (gain hydrique des vêtements).

La perte hydrique du participant associée à la sudation durant le test était mesurée par la pesée du participant en caleçon avant et après le test. Les résultats obtenus sont présentés en pourcentage de la masse corporelle perdue durant le test ($[(\text{masse avant le test} - \text{masse après le test}) / \text{masse avant le test}] \times 100$).

La pesée des vêtements de corps et du VIP du participant avant et après le test a aussi été faite pour estimer la quantité de sueur retenue dans l'habillement après le test. Afin de rendre comparables entre elles les données d'augmentation de la masse des vêtements, elles ont été mises en pourcentage de gain par rapport à la masse du participant avant le test ($[(\text{masse des vêtements avant le test} - \text{masse des vêtements après le test}) / \text{masse du participant avant le test}] \times 100$), donnant ainsi le gain hydrique retenu dans les vêtements de corps et dans le VIP durant le test.

3.4.6 Évaluation psychophysique de l'effort

L'évaluation psychophysique était utilisée lors de la réalisation des tests sur le tapis roulant pour connaître la perception ressentie par les participants de l'intensité de l'effort imposé par les différents VIP évalués. Il a été démontré que pendant un exercice,

l'évaluation psychophysique a une relation linéaire avec l'intensité de l'exercice. Sköldstrom (1987) a démontré que la forte corrélation, observée entre l'évaluation psychophysique et la fréquence cardiaque, révèle que les participants sont très conscients des contraintes physiologiques que l'intensité du travail physique et la chaleur leur imposent. L'échelle utilisée lors de cette évaluation était celle de Borg 6-20 (Borg *et al.*, 2017). L'échelle 6-20 correspond au fait que chez les jeunes adultes, la fréquence cardiaque varie généralement de 60 à 200 battements par minute. C'est la plage possible entre l'état de repos et la fréquence cardiaque maximale. Durant toute la séquence, le participant devait transmettre à l'expérimentateur sa perception de son effort physique toutes les 5 minutes en pointant le niveau inscrit sur un panneau (Figure 13) situé très près de lui à droite du tapis roulant. Pour un test de 45 minutes, 8 mesures étaient prises pour évaluer la progression de l'effort ressenti.

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

Figure 13. Illustration des niveaux de perception de l'effort selon l'échelle de Borg 6-20 présenté sur un panneau situé devant le tapis roulant

3.5 Procédure lors des tests sur le tapis roulant

La journée des tests débutait par l'accueil du participant où il était questionné pour confirmer le respect des conditions préalables à l'expérimentation. En effet, les participants devaient 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 (caféine) 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;

- Porter la même tenue sous le VIP (short, T-shirt et espadrilles de course) lors des tests;
- Avoir la barbe bien rasée pour les expérimentations (nécessaire pour le port de l'appareil servant à mesurer la consommation d'oxygène).

La sonde pour mesurer la température interne du corps était ingérée ainsi que 500 ml d'eau. Un délai de 45 minutes après l'ingestion de la sonde était recommandé par le fournisseur pour obtenir des données de la température interne corporelle fiable. L'instrumentation du participant prenait environ 15 minutes à compléter. Ensuite, le participant devait se placer en position assise pour une période de 5 minutes pour évaluer sa fréquence cardiaque de repos. Par la suite, le participant entrait dans la chambre climatique et il débutait sa marche sur le tapis roulant. Toutes les 5 minutes, une évaluation psychophysique était réalisée via sa perception subjective de l'effort selon l'échelle de Borg.

Le sujet pouvait mettre fin au test à tout moment en appuyant sur un interrupteur placé sur une rampe du tapis roulant. Pour toutes les conditions, les tests ont été poursuivis durant 45 minutes, à moins qu'un des critères d'arrêt suivants fût atteint :

- Arrêt volontaire du participant ou par l'expérimentateur à la suite de signes de fatigue ou des symptômes, chez le participant, de troubles liés à la contrainte thermique en ambiance chaude);
- Fréquence cardiaque dépassant 85 % de la FC maximale estimée;
- Température interne du corps supérieure à 39 °C.

Une fois le test terminé, le participant effectuait un retour au calme à l'extérieur de la chambre climatique, qui était d'environ 23 °C. Le déroulement chronologique de toutes les étapes suivies lors des évaluations est détaillé à l'annexe B.

3.6 Tests d'appréciation subjective du confort

L'appréciation subjective du confort des VIP était évaluée lors de la réalisation des huit mouvements suivants (Figure 14) : flexion du tronc vers l'avant, rotation du tronc vers la droite en position chevalier jambe droite fléchie à l'avant, rotation du tronc vers la gauche en position chevalier jambe gauche fléchie à l'avant, flexion des épaules (élévation des bras vers le haut), position accroupie, position agenouillée, flexion de la hanche droite et flexion de la hanche gauche. L'ordre dans lequel les VIP étaient testés était aléatoire d'un participant à l'autre. Les participants devaient marquer d'un X au crayon le niveau de confort ressenti sur une échelle analogue allant de « très confortable » à « très inconfortable » et ce, pour certaines régions du corps. Ces échelles sont présentées à l'annexe C. Ensuite, le niveau indiqué par le participant sur l'axe de l'échelle a été converti en pourcentage pour les analyses. Une valeur près de 1 correspond à une situation « très confortable » alors qu'une valeur près de 100 est considérée comme « très inconfortable ».



Flexion vers l'avant



Rotation vers la droite en position du chevalier jambe droite fléchie à l'avant



Rotation vers la gauche en position du chevalier jambe gauche fléchie à l'avant



Flexion des épaules



Position accroupie



Position agenouillée



Flexion de la hanche droite



Flexion de la hanche gauche

Figure 14. Représentation des mouvements pour les tests d'appréciations subjectives du confort

3.7 Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide du logiciel SPSS (version 28). Des analyses de la variance (ANOVA) à mesures répétées à un facteur (VIP) étaient réalisées sur les variables dépendantes qui n'ont pas été séparées par période, soit la consommation d'oxygène et la perte hydrique. Des ANOVA à mesures répétées à deux facteurs (périodes et VIP) étaient réalisées sur les autres variables dépendantes séparées par période, soit la fréquence cardiaque, la température corporelle interne, la température et humidité à l'intérieur du VIP et les mesures psychophysiques. L'ANOVA à deux facteurs a permis de déterminer les effets d'interaction entre les VIP et les périodes.

Un test de sphéricité de Mauchly a d'abord été effectué pour déterminer si une correction devait être appliquée aux données. Si le test de sphéricité de Mauchly était non significatif, aucune correction n'était appliquée. Si le test était significatif, les corrections Greenhouse-Geisser (estimation de sphéricité $<0,75$) ou Huynh-Feldt (estimation de sphéricité $>0,75$) étaient appliquées. Si l'effet de l'interaction entre les VIP et les périodes était significatif, une décomposition en effet simple a été effectuée. Dans les cas où un effet dans l'analyse de la variance était significatif, la correction de Bonferroni a été appliquée avant d'effectuer le test de comparaisons multiples des effets principaux afin de discriminer objectivement les écarts significatifs entre les vêtements. Un seuil de confiance de 5 % ($p < 0,05$) a été utilisé pour l'ensemble des analyses.

Pour augmenter la puissance statistique, les données ont été regroupées selon les caractéristiques des VIP, ce qui a permis d'isoler expérimentalement les effets :

- des deux designs d'habits Traditionnel et Innovateur, en combinant les conditions DT M1 & DT M2, ainsi que DI M1 & DI M2;
- des deux membranes barrières M1 et M2, en combinant les conditions DT M1 & DI M1, ainsi que DI M2 & DT M2;
- du système d'aération, soit de comparer Innovateur-M2 sans aération avec Innovateur-M2 avec aération.

Pour réaliser ces analyses comparatives (Traditionnel vs Innovateur, membranes M1 vs M2, avec vs sans système d'aération), des tests de Student (tests t) pour échantillons appariés ont été effectués pour chacune des variables dépendantes évaluées. Pour celles séparées par période, les valeurs des périodes 25, 35 et 45 minutes ont été moyennées pour les fins de comparaison.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

4.1 Résultats des tests sur le tapis roulant

4.1.1 Consommation d'oxygène

Les valeurs de VO_2 étaient plutôt stables après les 5 premières minutes du test, donc les données ont été moyennées de la 5^e à la 45^e minute. Selon les résultats des tests t présentés dans le Tableau 6, l'analyse des données des designs d'habits ($p=0,925$), des membranes barrières ($p=1\ 000$) et du système d'aération ($p=0,792$) n'a pas montré de différences significatives de la consommation d'oxygène. Comme cette variable représente essentiellement la charge mécanique imposée aux muscles, les différences de masse évaluées entre les conditions de VIP (Tableau 5) ne semblent pas assez grandes pour avoir un effet significatif sur la consommation d'oxygène. Ce résultat permet de valider que les variations des résultats des autres mesures physiologiques seront davantage associées à la thermorégulation et non pas à une différence de la charge mécanique imposée par les VIP au niveau des articulations. La comparaison entre les deux designs ne démontre pas que le design Innovateur favorise de manière significative l'aisance de mouvement des membres inférieurs lors d'un test de marche.

Tableau 6. Résultats des analyses statistiques obtenues pour la consommation d'oxygène (VO_2). (N=10)

Conditions	Consommation d'oxygène (ml/kg/min)	Valeur t	Valeur p
Traditionnel	15,73 ± 3,40	0,096	0,925
Innovateur	15,70 ± 3,12		
M1	15,71 ± 3,52	-0,001	1 000
M2	15,71 ± 3,06		
Innovateur-M2	15,77 ± 3,16	0,272	0,792
Innovateur-M2 aération	15,61 ± 3,80		

4.1.2 Perception psychophysique de l'effort

L'ANOVA à deux facteurs avec mesures répétées a permis de déceler une différence significative de la perception psychophysique de l'effort avec l'échelle de Borg seulement pour le facteur période ($p < 0,001$). L'analyse ne démontre pas d'effet d'interaction entre ce facteur et les VIP ($p = 0,697$). La durée du test augmente progressivement la perception de l'effort chez l'ensemble des participants malgré que la charge de travail imposée par le tapis demeure constante (Figure 15).

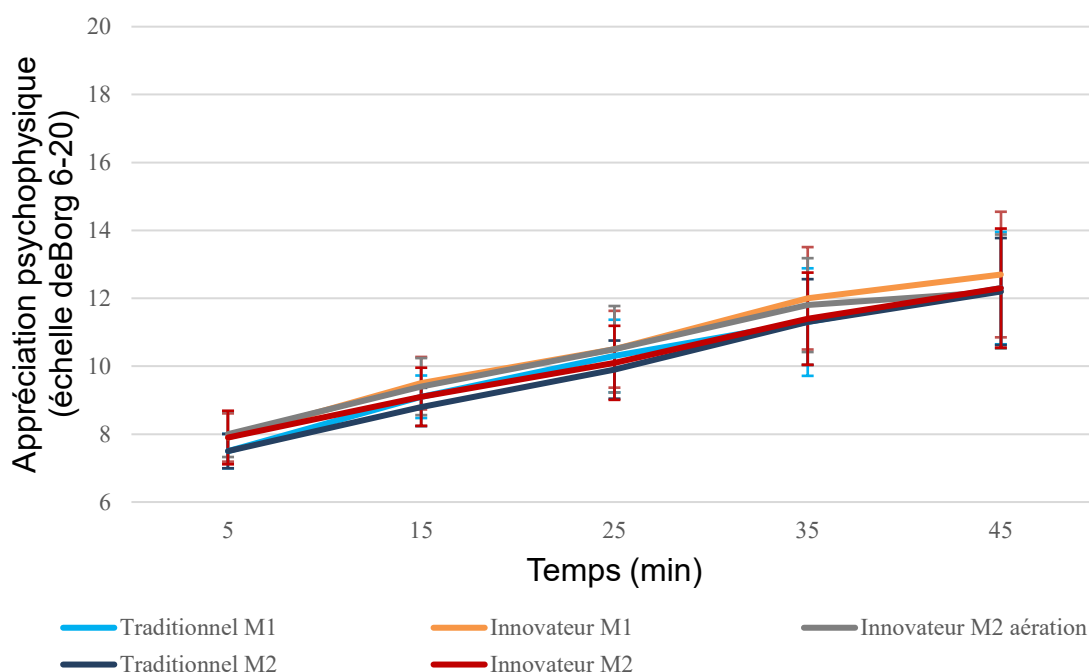


Figure 15. Appréciations psychophysiques moyennées selon les différentes conditions évaluées

Tableau 7. Résultats statistiques de l'appréciation psychophysique des participants (échelle de Borg 6 à 20) (N=10)

Conditions	Appréciation psychophysique ¹	Valeur t	Valeur p
Traditionnel	11,22 ± 1,76	-0,762	0,466
Innovateur	11,50 ± 1,93		
M1	11,52 ± 1,85	3,143	0,012*
M2	11,20 ± 1,66		
Innovateur-M2	11,27 ± 1,91	-0,938	0,373
Innovateur-M2 aération	11,50 ± 1,85		

¹ Les valeurs sont des moyennes ± écart type* $p < 0,05$

Les résultats des tests t présentés au Tableau 7 laissent voir que l'appréciation psychophysique de l'effort était significativement différente entre les deux membranes barrières ($p=0,012$). La membrane M2 semble diminuer légèrement l'effort perçu lorsqu'elle est comparée à la membrane M1 ($11,20 \pm 1,66$ vs $11,52 \pm 1,85$ respectivement).

4.1.3 Fréquence cardiaque

Les résultats de fréquence cardiaque sont présentés à la Figure 16. L'ANOVA à deux facteurs avec mesures répétées n'a pas permis de détecter d'interaction significative entre les habits et les périodes ($p=0,324$). L'analyse des effets principaux montre que les VIP n'étaient pas significativement différents ($p=0,458$) et les périodes étaient significativement différentes ($p<0,001$). Les battements de travail les moins élevés obtenus après les 15 premières minutes du test l'ont été pour la condition de VIP Traditionnel-M2.

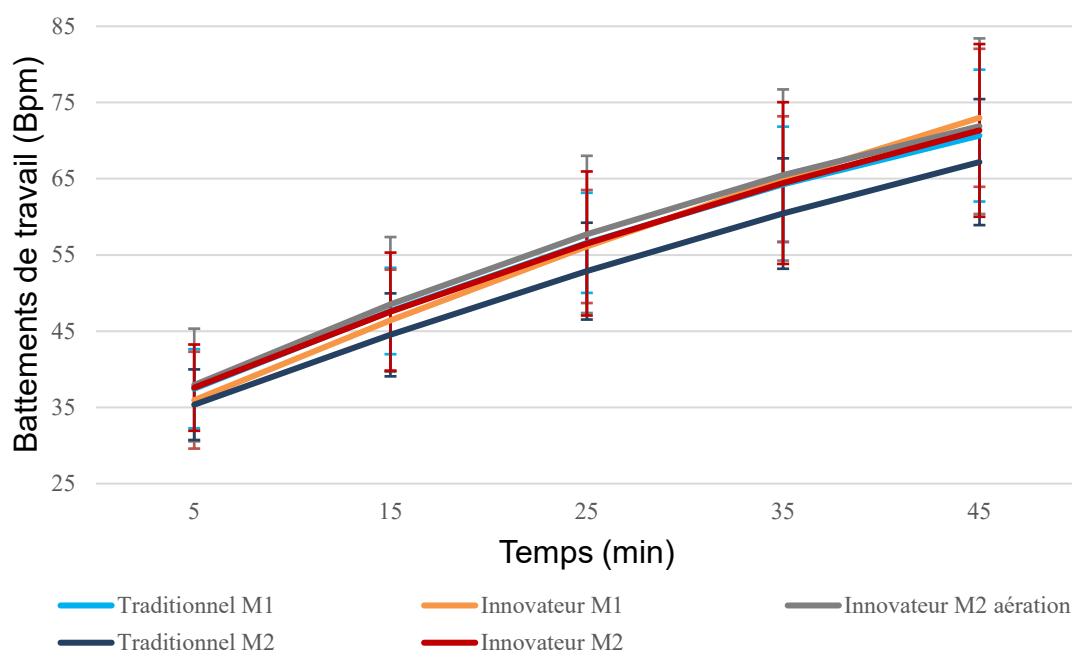


Figure 16. Battements de travail moyennés selon les différentes conditions évaluées

Les résultats des tests t présentés au Tableau 8 ne montrent aucune différence significative entre les designs d'habits ($p=0,19$), les membranes barrières ($p=0,31$) et le nouveau système d'aération ($p=0,79$).

Tableau 8. Résultats statistiques de l'augmentation des battements de travail des participants (N=10)

Conditions	Battements de travail ¹ (bpm)	Valeur t	Valeur p
Traditionnel	62,0 ± 9,5	-1,414	0,191
Innovateur	64,4 ± 12,3		
M1	64,3 ± 10,5	1,088	0,305
M2	62,1 ± 11,7		
Innovateur-M2	64,1 ± 14,6	-0,272	0,792
Innovateur-M2 aération	65,0 ± 15,3		

¹ Les valeurs sont des moyennes ± écart type

La vitesse et la pente du tapis roulant demandent aux participants un effort constant de 45 minutes. Dans cette situation où les contraintes thermiques sont présentes, on remarque qu'il n'y a aucune stabilisation des battements de travail durant le test malgré que la charge de travail imposée par le tapis demande un effort correspondant à 30 % du VO₂ max en tenue sportive. Comme l'évaporation de la sueur est limitée par le VIP, les battements de travail ne cessent d'augmenter afin qu'une plus grande quantité de sang soit acheminée vers la peau pour être refroidie. Cette variable représente bien la charge thermorégulatrice qu'impose le port de VIP en situation d'effort soutenu.

4.1.4 Température à l'intérieur des VIP

Les résultats de température à l'intérieur des VIP sont présentés à la Figure 17 pour la couche interne et la Figure 18 pour la couche externe. Dans la couche interne, l'ANOVA à deux facteurs avec mesures répétées a permis de déceler une différence significative seulement pour le facteur période ($p < 0,001$). Les VIP ne sont pas significativement différents ($p = 0,682$). L'analyse ne démontre pas d'effet d'interaction entre les périodes et les VIP ($p = 0,153$). La durée du test augmente progressivement la température dans la couche interne des VIP pour atteindre des valeurs entre 36 et 37 °C à la fin du test. Dans la couche externe, l'interaction entre les VIP et les périodes était non significative ($p = 0,059$). Pour les effets principaux, les VIP n'étaient pas significativement différents ($p = 0,418$) et les périodes étaient significativement différentes ($p < 0,001$). Encore ici, la température dans la couche externe des VIP augmente progressivement durant le test pour atteindre des valeurs entre 35 et 36 °C à la fin du test. On dénote un écart de 1 °C entre les deux couches, interne et externe.

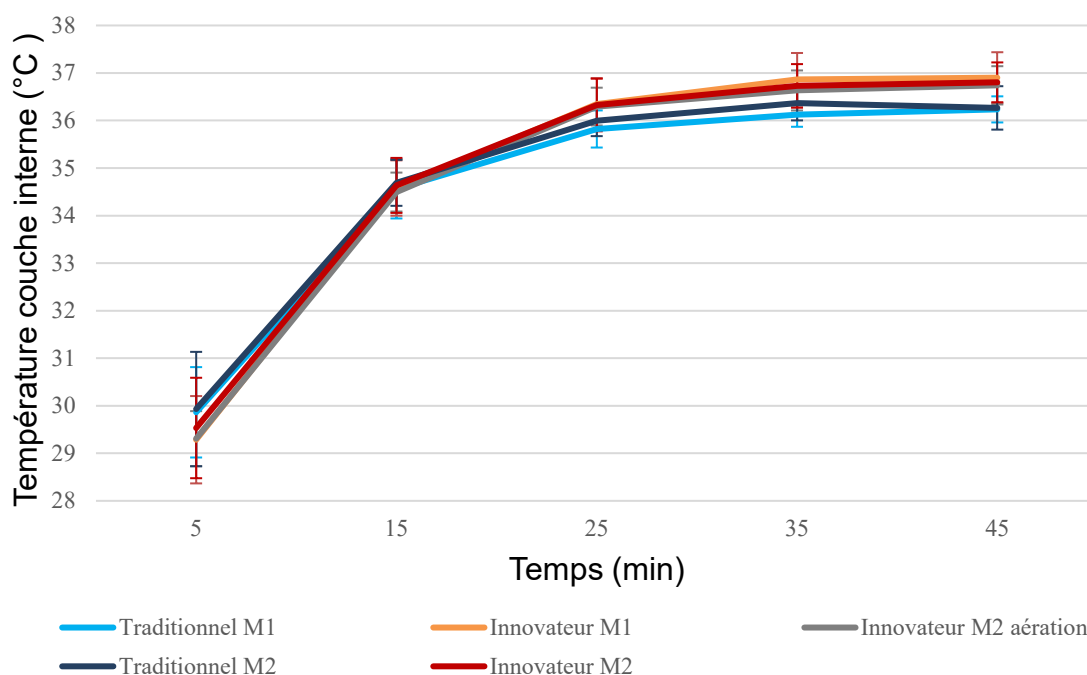


Figure 17. Températures dans la couche interne du VIP moyennées selon les différentes conditions évaluées

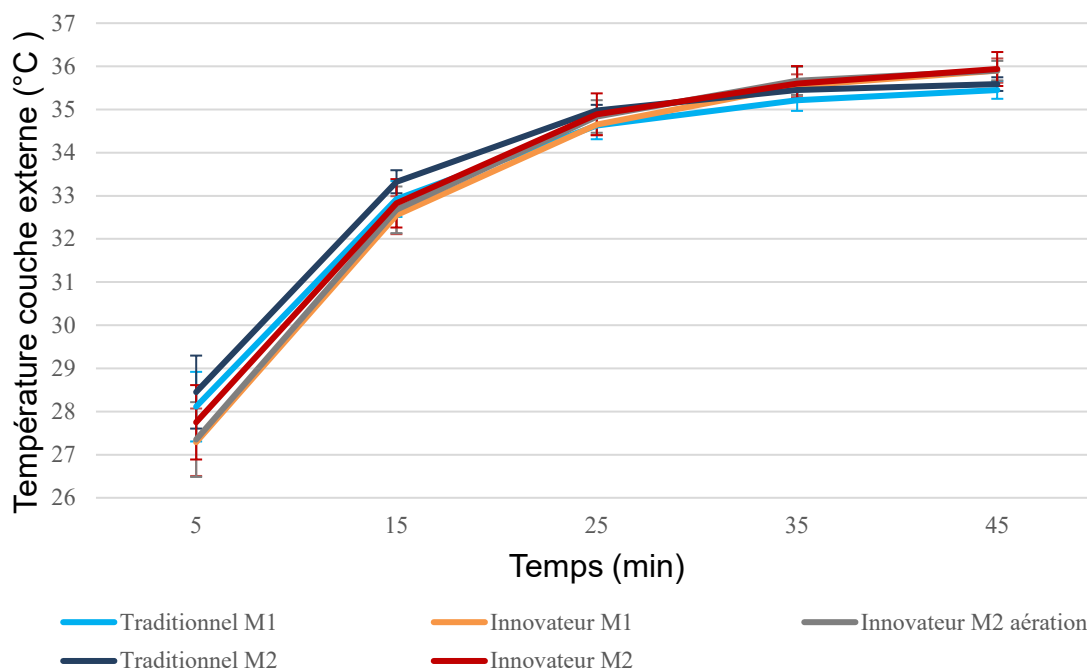


Figure 18. Températures dans la couche externe du VIP moyennées selon les différentes conditions évaluées

Les résultats des tests t présentés au Tableau 9 laissent voir que les températures dans la couche interne sont significativement différentes entre les deux designs d'habits ($p=0,005$). En effet, la température dans le modèle Innovateur est plus élevée que dans le modèle Traditionnel ($36,7\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$ vs $36,2\text{ °C} \pm 0,3\text{ °C}$ respectivement). Cependant, pour les membranes barrières, les températures dans la couche interne ne sont pas significativement différentes ($p=0,841$). Le nouveau système d'aération ne procure pas de changement significatif dans cette couche interne ($p=0,703$). Pour la couche externe, les résultats ne présentent pas de différences significatives pour les trois comparaisons.

Tableau 9. Résultats statistiques de la température à l'intérieur des couches interne et externe des VIP (N=10)

Localisation	Conditions	Température ¹ (°C)	Valeur t	Valeur p
Couche interne	Traditionnel	$36,2 \pm 0,3$	-3,717	0,005*
	Innovateur	$36,7 \pm 0,5$		
	M1	$36,4 \pm 0,4$	-0,207	0,841
	M2	$36,5 \pm 0,5$		
	Innovateur-M2	$36,6 \pm 0,6$	-0,395	0,703 ²
	Innovateur-M2 aération	$36,6 \pm 0,5$		
Couche externe	Traditionnel	$35,2 \pm 0,2$	-2,017	0,074
	Innovateur	$35,4 \pm 0,4$		
	M1	$35,2 \pm 0,3$	-1,957	0,082
	M2	$35,4 \pm 0,3$		
	Innovateur-M2	$35,5 \pm 0,6$	-0,031	0,976
	Innovateur-M2 aération	$35,5 \pm 0,4$		

¹ Les valeurs sont des moyennes $\pm$ écart type

² N=9

* $p < 0,05$

Les températures à l'intérieur des couches interne et externe des VIP augmentent de manière significative entre les périodes. Lorsque les trois dernières périodes sont moyennées et que les VIP sont regroupés par caractéristiques, une différence est remarquée au niveau du design de l'habit. En effet, la température dans le modèle Innovateur est plus élevée que dans le modèle Traditionnel, et cette température augmente rapidement au début des tests pour atteindre la température ambiante du laboratoire de 35 °C, un peu avant la 20^e minute dans la couche interne (Figure 17) et près de la 25^e minute dans la couche externe (Figure 18). L'accumulation de chaleur est plus importante près du corps du participant (couche interne) que dans la couche plus éloignée (couche externe). Ces résultats démontrent que la température ambiante ne pénètre pas rapidement dans le VIP, mais que la chaleur produite par le corps fait changer plus rapidement la température à l'intérieur de l'habit pour atteindre des valeurs qui se rapprochent de la température interne du corps.

4.1.5 Humidité relative à l'intérieur des VIP

Les résultats d'humidité à l'intérieur des VIP sont présentés à la Figure 19 pour la couche interne et la Figure 20 pour la couche externe. Dans la couche interne, l'ANOVA à deux facteurs avec mesures répétées a permis de déceler une différence significative de l'humidité relative seulement pour le facteur période ($p < 0,001$). Les VIP ne sont pas significativement différents ($p = 0,094$). L'analyse ne démontre pas d'effet d'interaction entre les périodes et les VIP ($p = 0,837$). Toutefois, la combinaison Traditionnel-M1 présente les valeurs les plus élevées pour chaque période. Les valeurs les plus basses sont obtenues pour la combinaison Innovateur-M2. L'humidité relative dans la couche interne des VIP augmente progressivement durant le test pour atteindre des valeurs entre 82,5 et 88,0 % à la fin du test. Dans la couche externe, l'interaction entre les VIP et les périodes est significative ($p = 0,017$). Cette interaction semble uniquement attribuable aux grandes variations d'humidité relative obtenues lors de la première période entre les VIP. Après 15 minutes, les données deviennent plutôt stables et les valeurs sont comprises entre 58,5 et 62,5 % à la fin du test. On dénote un écart entre les deux couches interne et externe qui dépasse les 20 % après 25 minutes d'effort. Les valeurs les plus basses sont obtenues pour la combinaison Innovateur-M2 lors des trois dernières périodes.

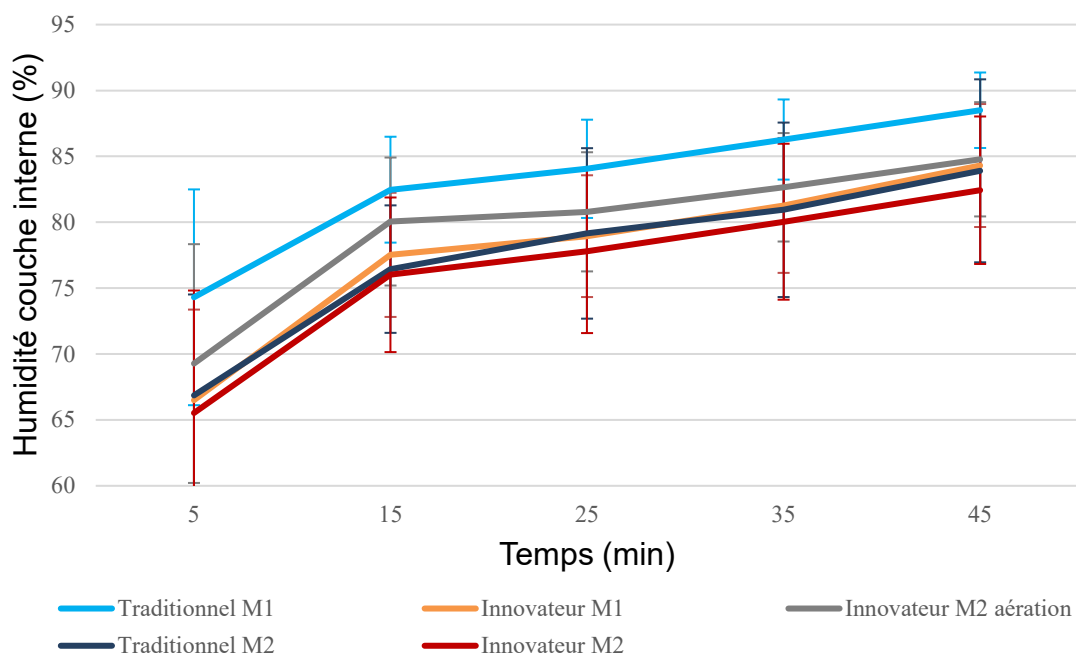


Figure 19. Humidité dans la couche interne du VIP moyennées selon les différentes conditions évaluées

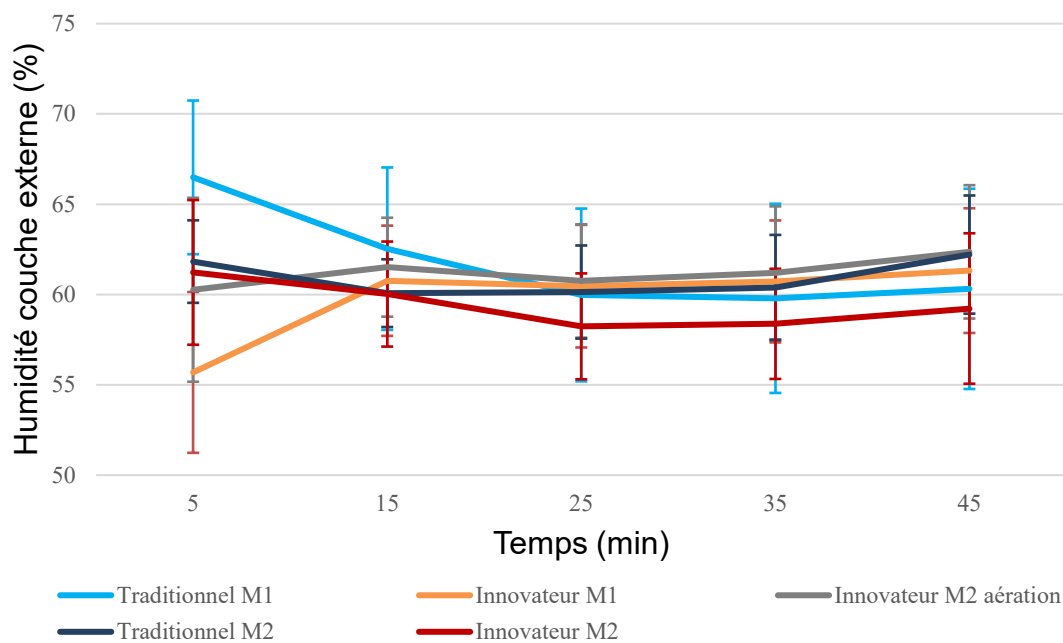


Figure 20. Humidité dans la couche externe du VIP moyennées selon les différentes conditions évaluées

Les résultats des tests t présentés au Tableau 10 laissent voir que l'humidité relative mesurée dans la couche interne n'est pas significativement différente entre les deux designs d'habits ($p=0,139$). Pour les membranes barrières, les résultats de la membrane M2, dans la couche interne, démontrent une tendance à réduire l'humidité relative ($p=0,054$). Le nouveau système d'aération ne procure pas de changement significatif dans cette couche interne ($p=0,280$). Pour la couche externe, les résultats ne présentent aucune différence significative pour les trois comparaisons.

Tableau 10. Résultats statistiques de l'humidité relative à l'intérieur de la couche interne et externe des VIP (N=10)

Localisation	Conditions	Humidité relative ¹ (%)	Valeur t	Valeur p
Couche interne	Traditionnel	83,2 ± 5,5	1,625	0,139
	Innovateur	80,5 ± 6,2		
	M1	83,4 ± 4,4	2,210	0,054
	M2	80,2 ± 6,9		
	Innovateur M2	80,1 ± 7,6	-1,158	0,280 ²
	Innovateur M2 aération	82,7 ± 5,5		
Couche externe	Traditionnel	60,5 ± 4,7	0,443	0,668
	Innovateur	59,7 ± 3,8		
	M1	60,4 ± 4,8	0,452	0,662
	M2	59,8 ± 3,3		
	Innovateur M2	58,6 ± 4,6	-1,049	0,321
	Innovateur M2 aération	61,4 ± 4,9		

¹ Les valeurs sont des moyennes ± écart type

² N=9

L'humidité relative à l'intérieur de la couche interne des VIP augmente de manière significative entre les périodes (Figure 19). Au niveau de l'humidité à l'intérieur de la couche externe, il est difficile d'émettre une hypothèse expliquant la variation des données pour les temps à 5 et à 15 minutes (Figure 20), puisque les diminutions et augmentations ne semblent ni associées à la coque extérieure ni à la membrane barrière. Lorsque les trois dernières périodes sont moyennées et que les VIP sont regroupés par caractéristiques, une tendance est remarquée au niveau de la membrane barrière. L'humidité dans la membrane M1 est plus élevée que dans la membrane M2. Contrairement aux données de température à l'intérieur de la couche interne, dont la

disparité entre les habits semble augmenter avec le temps, la disparité entre les habits pour les données d'humidité de la couche interne est de moins en moins grande. Dans la couche interne, la plus grande différence au temps à 5 min et à 45 min se trouve entre le modèle Traditionnel-M1 et le modèle Innovateur-M2 (5 min : $74,31 \pm 10,65 \%$ vs $65,53 \pm 12,09 \%$; 45 min : $88,50 \pm 3,73 \%$ vs $82,43 \pm 7,28 \%$, respectivement). Il y a donc une diminution de l'écart entre la moyenne des données au fil du temps (passant d'un écart de $8,78 \%$ à $6,07 \%$). Ces résultats suggèrent que les différences au niveau de la perméabilité des membranes sont d'autant plus remarquées dans les premières minutes du test et cette différence est moins importante lorsque l'humidité commence à s'accumuler dans les membranes. Pour toutes les conditions, l'humidité relative dépasse la valeur de 80% . Une humidité relative de 80% signifie que l'air contient 80% du maximum de vapeur d'eau qu'il peut absorber à cette température, ce qui limite beaucoup l'évaporation de la sueur qui permet au corps de se refroidir.

4.1.6 Température corporelle interne

Les résultats de la température corporelle interne sont présentés à la Figure 21. Pour cette variable, une ANOVA à mesure répétée à 2 facteurs a été effectuée pour vérifier l'interaction entre les VIP et les temps des trois dernières périodes (25, 35 et 45 minutes) où les valeurs étaient plus stables pour l'ensemble des participants. L'analyse des effets principaux laisse voir que l'augmentation de la température corporelle interne entre les périodes 25, 35 et 45 minutes était significative ($p < 0,001$). L'interaction entre les VIP et les périodes était aussi significative ($p = 0,044$). La condition Innovateur-M2 avec le système d'aération cause une augmentation plus grande de la température selon les périodes. Une analyse post-hoc démontre que les VIP Traditionnel-M2 et Innovateur-M2 aération étaient significativement différents pour la période à 45 minutes ($p = 0,025$). Les valeurs les plus basses et les plus élevées sont obtenues, respectivement, pour le VIP Traditionnel-M2 et le VIP Innovateur-M2 aération.

L'analyse des tests t avec les échantillons appariés présentée au Tableau 11 démontre une différence significative entre le modèle Innovateur-M2 et le modèle Innovateur-M2 avec aération ($p = 0,02$). La température interne des participants lors du port du VIP Innovateur-M2 avec aération était en moyenne plus élevée que lors du port du modèle Innovateur-M2 ($37,78 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,33 \text{ }^{\circ}\text{C}$ vs $37,63 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,27 \text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivement).

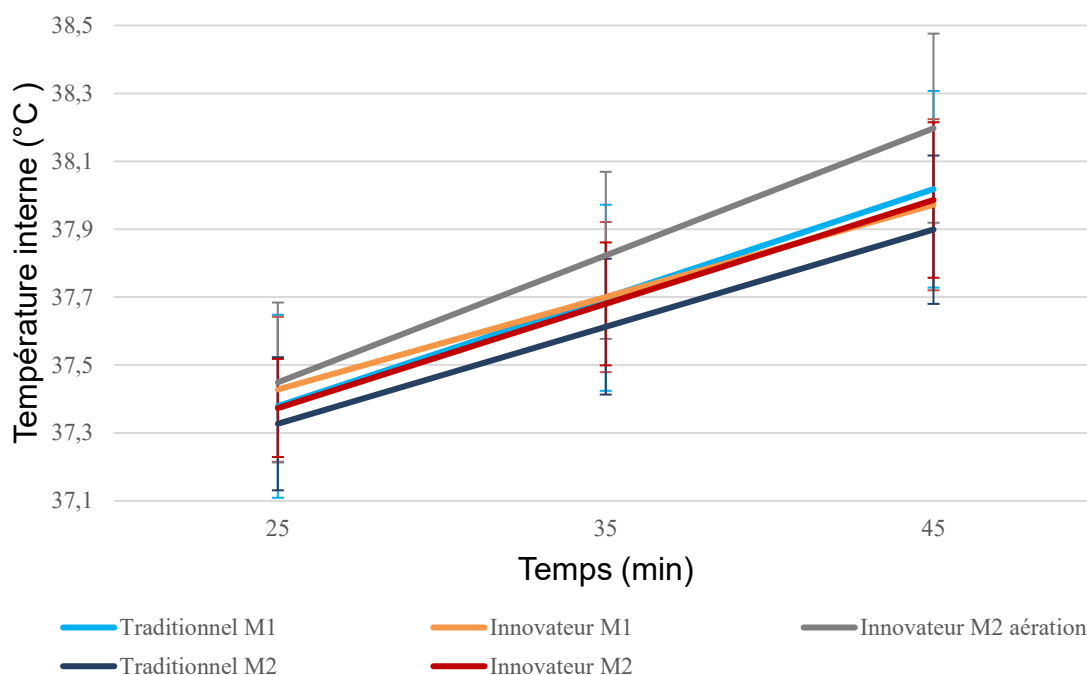


Figure 21. Températures internes moyennées selon les différentes conditions évaluées

Tableau 11. Résultats statistiques de l'augmentation de la température interne des participants (N=10)

Conditions	Température interne ¹ (°C)	Valeur t	Valeur p
Traditionnel	37,62 ± 0,31	-0,951	0,367
Innovateur	37,65 ± 0,27		
M1	37,67 ± 0,31	1,367	0,205
M2	37,60 ± 0,26		
Innovateur-M2	37,63 ± 0,27	-2,861	0,019*
Innovateur-M2 aération	37,78 ± 0,33		

¹Les valeurs sont des moyennes ± écart type

*p<0,05

La température corporelle interne des participants augmente donc de manière significative entre les périodes et le VIP Innovateur-M2 aération semble être la condition la plus contraignante vers la fin du test. En général, les températures corporelles internes mesurées sont plutôt stables durant les 15 premières minutes du test à l'effort (exemple à la Figure 8). Après la 15^e minute, l'augmentation de la température corporelle interne coïncide avec la fin des hausses rapides de la température et de l'humidité relative dans la couche interne du VIP (Figure 17 et Figure 19, respectivement). Lorsque la température et l'humidité relative dans le vêtement atteignent un plateau (notable après la 25^e minute), la température corporelle interne augmente de manière linéaire. Avec une humidité relative qui dépasse les 75 %, les voies d'échange thermique deviennent limitées par le port du vêtement. L'accumulation d'humidité dans le vêtement limite l'évaporation de la sueur, le processus de thermorégulation est alors limité et la température corporelle interne du participant augmente. Pour le VIP Innovateur-M2 aération, il semble que l'avantage d'avoir des canaux d'aération, observé durant les premières minutes, se transforme en désavantage vers la fin du test probablement à cause de l'effet d'isolation que produisent les matériaux utilisés dans la conception de ce système d'aération.

4.1.7 Perte hydrique

La perte hydrique, soit le pourcentage de masse corporelle perdue durant le test, est présentée au Tableau 12. La perte de masse moyenne des participants (en valeur absolue, et non en pourcentage) a été de 0,86 kg pour le VIP Traditionnel-M1, de 0,86 kg pour le VIP Traditionnel-M2, de 0,82 kg pour le VIP Innovateur-M1, de 0,87 kg pour le VIP Innovateur-M2 et de 0,80 kg pour le VIP Innovateur-M2 aération. Les données de perte hydrique ont été analysées à l'aide d'un test t selon les différentes caractéristiques des VIP, et aucune différence significative n'a été trouvée.

De cette perte hydrique des participants, une portion de la sueur est restée emprisonnée dans les vêtements de corps du participant, soit le T-shirt et les chaussettes. Le gain hydrique des vêtements de corps, soit le pourcentage de gain de la masse de ces vêtements par rapport à la masse du participant, est présenté au Tableau 13.

L'augmentation moyenne de la masse des vêtements de corps (en valeur absolue, et non en pourcentage) a été de 0,18 kg pour le VIP Traditionnel-M1, de 0,18 kg pour le VIP Traditionnel-M2, de 0,17 kg pour le VIP Innovateur-M1, de 0,17 kg pour le VIP Innovateur-M2 et de 0,16 kg pour le VIP Innovateur-M2 aération. Les données de gain hydrique des vêtements de corps ont été analysées à l'aide d'un test t selon les différentes caractéristiques des VIP. Aucune différence significative n'a été trouvée entre les différentes conditions.

Tableau 12. Résultats statistiques du pourcentage de perte de masse des participants après le test. Mesures réalisées en sous-vêtement (N=10)

Conditions	Perte hydrique ¹ (%)	Valeur t	Valeur p
Traditionnel	1,02 ± 0,23	0,502	0,628
Innovateur	1,00 ± 0,23		
M1	1,00 ± 0,27	-0,324	0,753
M2	1,02 ± 0,20		
Innovateur-M2	1,03 ± 0,23	1,404	0,194
Innovateur-M2 aération	0,95 ± 0,16		

¹ Les valeurs sont des moyennes ± écart type

Tableau 13. Résultats statistiques du pourcentage du gain hydrique des vêtements de corps (N=10)

Conditions	Gain hydrique des vêtements de corps ¹ (%)	Valeur t	Valeur p
Traditionnel	21,14 ± 3,05	0,772	0,460
Innovateur	20,45 ± 3,00		
M1	21,23 ± 2,61	0,905	0,389
M2	20,36 ± 3,46		
Innovateur-M2	20,19 ± 4,10	-0,153	0,882
Innovateur-M2 aération	20,40 ± 3,34		

¹ Les valeurs sont des moyennes ± écart type

Une autre portion de la perte hydrique des participants est restée emprisonnée dans les VIP, soit le manteau et le pantalon. Le gain hydrique des VIP, soit le pourcentage de gain de la masse de ces habits par rapport à la masse du participant, est présenté au Tableau 14. L'augmentation moyenne de la masse des VIP (en valeur absolue, et non en pourcentage) a été de 0,19 kg pour le VIP Innovateur-M2 et de 0,20 kg pour les autres VIP. Les données ont été analysées à l'aide d'un test t selon les différentes caractéristiques des VIP. Même si aucune différence significative n'a été trouvée entre les différentes conditions, on remarque que le VIP Innovateur-M2 avec aération obtient une valeur supérieure aux autres conditions. Il semble que les matériaux du système d'aération retiennent davantage d'humidité dans le VIP.

Tableau 14. Résultats statistiques du pourcentage du gain hydrique des VIP (N=10)

Conditions	Gain hydrique des VIP ¹ (%)	Valeur t	Valeur p
Traditionnel	23,20 ± 4,49	0,074	0,943
Innovateur	23,09 ± 4,46		
M1	23,82 ± 4,31	1,094	0,302
M2	22,47 ± 4,17		
Innovateur-M2	23,29 ± 4,74	-1,816	0,107 ²
Innovateur-M2 aération	27,14 ± 4,38		

Les valeurs sont des moyennes ± écart type

N=9

4.2 Résultats des tests d'appréciation subjective du confort

Les résultats d'appréciation subjective du confort ont été analysés à l'aide d'un test t. Les différentes caractéristiques des VIP évaluées par ce test sont le design des habits (Traditionnel vs Innovateur), ainsi que le modèle Innovateur-M2 avec et sans aération (Tableau 15). Seuls les résultats pour le test de flexion du tronc vers l'avant ont permis de voir une différence significative des modèles Traditionnel et Innovateur pour le cou ($p=0,028$), la région pelvienne droite ($p=0,026$) et la région pelvienne gauche ($p=0,021$). Pour ces trois régions corporelles, le modèle Innovateur s'est avéré être plus inconfortable que le modèle Traditionnel. Des frottements au niveau du cou et des pressions aux hanches ont été mentionnés par les participants lors de la flexion du tronc. Aucune différence significative entre les modèles n'a été décelée pour les autres mouvements.

Tableau 15. Résultats statistiques de l'appréciation du mouvement de test de flexion vers l'avant (N=10)

Région	Conditions	Appréciation (%) ¹	Valeur t	Valeur p
Épaule droite	Traditionnel	25,0 ± 23,3	-0,081	0,937
	Innovateur	25,3 ± 17,1		
	Innovateur-M2	27,5 ± 18,2	1,019	0,335
	Innovateur-M2 aération	22,5 ± 19,8		
Épaule gauche	Traditionnel	25,3 ± 23,0	-0,339	0,742
	Innovateur	26,5 ± 16,7		
	Innovateur-M2	28,8 ± 17,5	1,231	0,250
	Innovateur-M2 aération	22,7 ± 20,1		
Cou	Traditionnel	19,0 ± 13,9	-2,609	0,028*
	Innovateur	40,2 ± 17,5		
	Innovateur-M2	37,5 ± 20,7	-1,815	0,103
	Innovateur-M2 aération	50,5 ± 24,3		
Poitrine	Traditionnel	20,0 ± 16,4	-0,034	0,973
	Innovateur	20,1 ± 15,0		
	Innovateur-M2	21,7 ± 19,3	-0,057	0,955
	Innovateur-M2 aération	21,9 ± 16,8		
Pelvienne droite	Traditionnel	14,4 ± 13,3	-2,670	0,026*
	Innovateur	23,3 ± 19,2		
	Innovateur-M2	25,0 ± 21,3	1,232	0,249
	Innovateur-M2 aération	20,6 ± 21,2		
Pelvienne gauche	Traditionnel	14,4 ± 13,0	-2,788	0,021*
	Innovateur	23,2 ± 19,0		
	Innovateur-M2	25,2 ± 21,4	1,208	0,258
	Innovateur-M2 aération	20,9 ± 21,0		

¹ Les valeurs sont des moyennes ± écart type. À noter qu'un faible pourcentage indique un meilleur confort perçu, alors qu'un pourcentage élevé indique un plus grand inconfort perçu.

5. LIMITES DE L'ÉTUDE

L'étude a été effectuée en laboratoire à une intensité d'effort constante de la part du participant, et à une température et une humidité relative constantes dans l'environnement du laboratoire. Cette situation diffère des situations de travail des pompiers dont l'intensité peut être variable et dont les températures peuvent être affectées par la proximité du feu et d'autres facteurs externes tels que la saison et les conditions météorologiques. Il est possible que le rendement des membranes barrières donne des résultats différents pour une température et une humidité relative ambiantes différentes de celles utilisées dans cette étude. La situation en laboratoire a pour but de conserver les différentes conditions environnementales comparables d'un test à l'autre pour que les contraintes physiologiques associées aux différentes composantes des VIP puissent être identifiées et quantifiées.

L'âge et la condition physique des pompiers qui portent ces VIP lors d'une intervention sont très variables. Or, l'échantillon des participants de cette étude n'est pas directement représentatif de la population cible. Les participants étaient tous des étudiants du Département des sciences de l'activité physique de l'UQAM. Ils se distinguaient possiblement d'une population de pompiers par leurs valeurs anthropométriques, leur condition physique, leur âge, leurs habitudes de vie et l'homogénéité du groupe. Le choix de cet échantillon a permis de réaliser des tests d'effort avec une intensité assez élevée, puisque les risques pouvant être associés à des efforts aussi intenses sont moins grands pour des participants en excellente condition physique.

Dans le but d'assurer la sécurité des participants, l'intensité de l'effort a été déterminée selon la fréquence cardiaque découlant du test de capacité cardiorespiratoire. Ce test estimait le VO_2 max à partir d'une régression linéaire des données obtenues jusqu'à l'atteinte d'une fréquence cardiaque équivalente à 85 % de la FC maximale théorique selon la formule d'Astrand, soit $220 - \text{âge}$. Cette équation, bien que très utilisée, n'est pas fondée sur des études approfondies et serait plutôt arbitraire. La FC maximale et le VO_2 max des participants n'ayant pas été mesurés, il est possible que l'intensité de la charge cardiorespiratoire définie pour chacun d'eux ne corresponde pas tout à fait à 30 % de leur VO_2 max en tenue sportive.

Bien que les vêtements étaient faits sur mesure pour les participants, il est possible que le partage des VIP par deux participants aux caractéristiques physiques similaires n'ait pas permis d'avoir un confort optimal pour chacun d'eux.

Les participants étaient tous bien informés des consignes avant la passation des tests au laboratoire. Il n'est pas possible de vérifier si les participants ont réellement respecté toutes les consignes pour éviter des situations de fatigue avant les tests. Les fréquences cardiaques de repos mesurées avant les tests de marche sur le tapis roulant ont démontré une certaine variabilité entre les évaluations.

CONCLUSION

L'objectif de cette recherche était d'évaluer l'effet de nouvelles technologies de conception des VIP, soit une nouvelle membrane barrière et un design d'habit innovateur, sur la réponse physiologique des participants portant les VIP dans un environnement chaud. La nouvelle membrane devait permettre d'optimiser la perméabilité à la vapeur d'eau et le transfert de chaleur produite par le corps lors des situations d'efforts physiques modérés, pour ainsi limiter l'augmentation de la température et retarder la saturation en humidité à l'intérieur du VIP. Les tests réalisés dans un environnement contrôlé à 35 °C et 50 % d'humidité relative avaient pour but d'isoler les effets qui sont uniquement attribuables aux différentes technologies utilisées pour la confection des VIP.

Pour les membranes barrières, bien que les valeurs de résistance évaporative démontrent un avantage pour la membrane prototype M2, seule la diminution de l'effort perçue par les participants valide statistiquement son efficacité. L'humidité relative dans la couche interne des VIP est plus faible de seulement 3,2 % pour cette nouvelle membrane. Bien que ce résultat ne soit pas tout à fait significatif, il appuie la tendance de l'efficacité de la membrane M2 comparativement à la membrane M1. Aucune autre des variables physiologiques mesurées ne démontre un avantage significatif de cette membrane par rapport à l'autre. Il semble que la combinaison des trois couches influence aussi l'évaporation de l'humidité présente dans la couche interne des VIP.

Pour les deux membranes barrières évaluées, des écarts de plus de 20 % d'humidité relative entre les couches interne (sous la barrière thermique) et externe (sous la coque extérieure) démontre que ces membranes ne permettent pas de transférer suffisamment l'humidité accumulée près du corps. Pour toutes les conditions de VIP, l'humidité relative mesurée dans la couche interne du VIP dépasse la valeur de 80 % après seulement 25 minutes d'effort. Une humidité relative de 80 % implique que l'air contient déjà 80 % du maximum de vapeur d'eau qu'il peut absorber, ce qui limite beaucoup l'évaporation de la sueur et empêche le corps de se refroidir.

Pour le nouveau design d'habit (Innovateur), la chaleur produite par le corps a fait augmenter la température dans la couche interne des VIP plus rapidement que pour le design Traditionnel, pour atteindre des valeurs qui se rapprochent de la température corporelle interne. Le design Innovateur semble aussi, selon l'évaluation subjective du confort par les participants, causer des frottements au niveau du cou et des pressions accrues aux hanches lors de la flexion du tronc.

Pour le système d'aération, la température corporelle interne des participants lors du port du VIP équipé de ce système était en moyenne plus élevée que sans l'ajout de ce système. Cette différence, qui n'est pas présente au début du test, devient plus importante avec la durée du test d'effort. L'avantage des canaux d'aération observé

durant les premières minutes se transforme en désavantage vers la fin du test, probablement à cause de l'effet d'isolation des matériaux utilisés pour sa conception.

Dans l'ensemble des résultats obtenus, aucune des conditions évaluées ne permet une stabilisation des variables associées au processus de thermorégulation. La température corporelle interne et la fréquence cardiaque augmentaient progressivement durant toute la durée du test malgré un effort physique relativement bas imposé par la pente et la vitesse du tapis roulant. À une certaine intensité d'effort, les VIP pourraient présenter un risque d'événement cardiorespiratoire et/ou de coup de chaleur dans des situations où l'exposition serait prolongée.

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

Il est important de continuer à améliorer l'efficacité des matériaux qui composent les VIP. En effet, le développement de nouvelles membranes barrières devrait permettre de réduire l'impact négatif du microclimat qui est présent dans la couche interne des VIP. Pour réussir à réduire les contraintes thermophysiologiques, il semble impératif d'abaisser l'humidité relative associée à ce microclimat.

BIBLIOGRAPHIE

ACSM – American College of Sport Medicine. (2000). *ACSM's Guidelines for Exercise Testing and Prescription*. (6e edition). Lippincott Williams et Wilkins.

ASTM International. (2016). Standard Practice for Determining the Physiological Responses of the Wearer to Protective Clothing Ensembles. ASTM F2668-16.

ASTM International. (2022). Standard test method for measuring the performance of personal cooling systems using physiological testing. ASTM F2300-10(2022).

Atalay, O., Kursun Bahadir, S., et Kalaoglu, F. (2015). An Analysis on the Moisture and Thermal Protective Performance of Firefighter Clothing Based on Different Layer Combinations and Effect of Washing on Heat Protection and Vapour Transfer Performance. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, 1-8.

<https://doi.org/10.1155/2015/540394>

Atha, W. F. (2013). Heat-related illness. *Emerg Med Clin North Am*, 31(4), 1097-1108.

<https://doi.org/10.1016/j.emc.2013.07.012>

AWCBC – Association of Workers' Compensation Boards of Canada (2011). Occupational (industrial) disease – Definitions, policy, schedules, regulation and legislation

http://www.awcbc.org/common/assets/legislation/occupational_disease.pdf

Baker, L. B. (2017). Sweating Rate and Sweat Sodium Concentration in Athletes: A Review of Methodology and Intra/Interindividual Variability. *Sports Med*, 47(Suppl 1), 111-128. <https://doi.org/10.1007/s40279-017-0691-5>

Balke, B. et Ware, R. (1959). An experimental study of physical fitness of airforce personnel. *US Armed Forces Medical Journal*, 10, 675–688.

Borg, D. N., Costello, J. T., Bach, A. J. et Stewart, I. B. (2017). Perceived exertion is as effective as the perceptual strain index in predicting physiological strain when wearing personal protective clothing. *Physiol Behav*, 169, 216-223.

<https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2016.12.009>

Bouchama, A., Abuyassin, B., Lehe, C., Laitano, O., Jay, O., O'Connor, F. G., et Leon, L. R. (2022). Classic and exertional heatstroke. *Nat Rev Dis Primers*, 8(1), 8.

<https://doi.org/10.1038/s41572-021-00334-6>

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

Busque, M.-A., Boucher, A., Lebeau, M., et Bastien, N. (2020). *Évolution des indicateurs annuels de lésions professionnelles indemnisées au Québec de 2012 à 2017* (Rapport de recherche R-1112). IRSST.

Carballo-Leyenda, B., Villa, J. G., López-Satué, J. et Rodríguez-Marroyo, J. A. (2017). Impact of Different Personal Protective Clothing on Wildland Firefighters' Physiological Strain. *Front Physiol*, 8, 618. <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00618>

CNESST - Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail. (2020). *Statistiques annuelles* [Document d'information].

Coca, A., Williams, W. J., Roberge, R. J. et Powell, J. B. (2010). Effects of firefighter protective ensembles on mobility and performance. *Applied ergonomics*, 41(4), 636-641.

Cramer, M. N. et Jay, O. (2019). Partitional calorimetry. *J Appl Physiol* (1985), 126(2), 267-277. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00191.2018>

Cramer, M. N., Gagnon, D., Laitano, O. et Crandall, C. G. (2022). Human temperature regulation under heat stress in health, disease, and injury. *Physiol Rev*, 102(4), 1907-1989. <https://doi.org/10.1152/physrev.00047.2021>

Faff, J. et Tutak, T. (1989). Physiological responses to working with fire fighting equipment in the heat in relation to subjective fatigue. *Ergonomics*, 32(6), 629-638. <https://doi.org/10.1080/00140138908966137>

Fahy, R. F. et Petrillo, J. T. (2022). *Firefighter Fatalities in the US in 2021*. National Fire Protection Association. <https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics-and-reports/Emergency-responders/osFFF.pdf>

Fahy, R. F., LeBlanc, P. R. et Molis J. L. (2017). *Firefighter fatalities in the United States 2016*. National Fire Protection Association (NFPA).

Fontana, P., Saiani, F., Grütter, M., Croset, J.-P., Capt, A., Camenzind, M., Morrissey, M., Rossi, R. M. et Annaheim, S. (2016). Exercise intensity dependent relevance of protective textile properties for human thermo-physiology. *Textile Research Journal*, 87(12), 1425-1434. <https://doi.org/10.1177/0040517516654105>

Gauer, R. et Meyers, B. K. (2019). Heat-Related Illnesses. *Am Fam Physician*, 99(8), 482-489.

Gleeson, M. (1998). Temperature regulation during exercise. *Int J Sports Med*, 19 Suppl 2, S96-99. <https://doi.org/10.1055/s-2007-971967>

Griefahn, B., Künemund, C. et Bröde, P. (2003). Evaluation of performance and load in simulated rescue tasks for a novel design SCBA: effect of weight, volume and weight distribution. *Appl Ergon*, 34(2), 157-165. [https://doi.org/10.1016/s0003-6870\(02\)00143-6](https://doi.org/10.1016/s0003-6870(02)00143-6)

Holmér, I. et Gavhed, D. (2007). Classification of metabolic and respiratory demands in fire fighting activity with extreme workloads. *Appl Ergon*, Jan;38(1):45-52.

Holmes, D. A. (2000). Waterproof breathable fabrics. Chapter 12 dans Horrocks A. R. et Anand S. (Editors), *Handbook of technical textiles* (Woodhead Publishing, p. 282-315). CRC Press.

IDSP – Industrial Disease Standards Panel (Occupational Disease Panel) (1994). *Report to the workers' compensation board on cardiovascular disease and cancer among firefighters*. (Report No. 13). IDSP.

Jung-Hyun, K., Powell, J. B., Roberge, R. J., Sheperd, A., Coca, A. (2014). Evaluation of protective ensemble thermal characteristics through sweating hot plate, sweating thermal manikin, and human tests. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*.
<https://doi.org/10.1080/15459624.2013.858820>

Kenny, G. P. et Flouris, A. D. (2014). The human thermoregulatory system and its response to thermal stress. In *Protective Clothing* (pp. 319-365).
<https://doi.org/10.1533/9781782420408.3.319>

Lawson, L. K., Crown, E. M., Ackerman, M. Y., et Douglas Dale, J. (2004). Moisture effects in heat transfer through clothing systems for wildland firefighters. *International journal of occupational safety and ergonomics*, 10(3), 227-238.

Lim, C. L., Byrne, C. et Lee, J. K. (2008). Human thermoregulation and measurement of body temperature in exercise and clinical settings. *Ann Acad Med Singap*, 37(4), 347-353.

Malchaire, J. (2004). Travail à la chaleur. *EMC-Toxicologie-Pathologie*, 1(3), 96-116.

Marchand, D., Gauvin, C., Brien-Breton, A., Aubertin-Leheudre, M., Tessier, D. et Sadier, Y. (2015). Évaluation de nouvelles technologies visant à réduire le stress thermophysilogique associé au port de vêtements individuels de protection pour les pompiers (Rapport de recherche R-891). IRSST.

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

National Fire Protection Association. (2018). Standard on Protective Ensembles for Structural Fire Fighting and Proximity Fire Fighting. NFPA, 1971.

Organisation internationale de normalisation. (2006). 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 14505-3:2006.

Organisation internationale de normalisation. (2014). Textiles - Effets physiologiques - Mesurage de la résistance thermique et de la résistance à la vapeur d'eau en régime stationnaire (essai de la plaque chaude gardée transpirante). ISO 11092:2014.

Parsons, K. (2014). Human thermal environments: The effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort, and performance. CRC Press.

Périard, J. D., Eijssvogels, T. M. H. et Daanen, H. A. M. (2021). Exercise under heat stress: thermoregulation, hydration, performance implications, and mitigation strategies. *Physiol Rev*, 101(4), 1873-1979. <https://doi.org/10.1152/physrev.00038.2020>

Romanovsky, A. A. (2007). Thermoregulation: some concepts have changed. Functional architecture of the thermoregulatory system. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, 292(1), R37-46. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00668.2006>

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

Schlader, Z. J. et Vargas, N. T. (2019). Regulation of Body Temperature by Autonomic and Behavioral Thermoeffectors. *Exerc Sport Sci Rev*, 47(2), 116-126. <https://doi.org/10.1249/jes.0000000000000180>

Sköldström, B. (1987). Physiological responses of firefighters to workload and thermal stress. *Ergonomics*, 30(11), 1589-1597. <https://doi.org/10.1080/00140138708966049>

Smith, D. L., DeBlois, J. P., Kales, S. N. et Horn, G. P. (2016). Cardiovascular Strain of Firefighting and the Risk of Sudden Cardiac Events. *Exerc Sport Sci Rev*, 44(3), 90-97. <https://doi.org/10.1249/jes.0000000000000081>

Smith, D. L., Petruzzello, S. J., Kramer, J. M. et Misner, J. E. (1997). The effects of different thermal environments on the physiological and psychological responses of firefighters to a training drill. *Ergonomics*, 40(4), 500-510. <https://doi.org/10.1080/001401397188125>

Somboonwong, J., Chutimakul, L. et Sanguanrungrasirikul, S. (2015). Core temperature changes and sprint performance of elite female soccer players after a 15-minute warm-up in a hot-humid environment. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 29(1):262–269.

USFA (U.S. Fire Administration) and National Fallen Firefighters Foundation. (2020). *Firefighter Fatalities in the United States in 2019*. U. S. Fire administration. <https://www.usfa.fema.gov/downloads/pdf/publications/firefighter-fatalities-2019.pdf>

USFA (U.S. Fire Administration) and National Fallen Firefighters Foundation. (2017). *Firefighter fatalities in the United States in 2016*. 45 pages.

- Von Heimburg, E. D., Rasmussen, A. K. et Medbø, J. I. (2006). Physiological responses of firefighters and performance predictors during a simulated rescue of hospital patients. *Ergonomics*, 49(2), 111-126. <https://doi.org/10.1080/00140130500435793>
- Warburton, D. E., Gledhill, N., Jamnik, V. K., Bredin, S. S., McKenzie, D. C., Stone, J., ... et Shephard, R. J. (2011). Evidence-based risk assessment and recommendations for physical activity clearance: Consensus Document 2011. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 36(S1), S266-S298.
- Williams-Bell, F. M., Boisseau, G., McGill, J., Kostiuk, A. et Hughson, R. L. (2010). Air management and physiological responses during simulated firefighting tasks in a high-rise structure. *Applied ergonomics*, 41(2), 251-259.
- Wilmore, J. H., Costill, D. L. et Kenney, L. W. (2009). Physiologie du sport et de l'exercice (4e éd). *Bruxelles : De Boeck*.
- Wright, H. E., Larose, J., McLellan, T. M., Miller, S., Boulay, P. et Kenny, G. P. (2013). Do Older Firefighters Show Long-Term Adaptations to Work in the Heat? *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 10(12), 705-715. <https://doi.org/10.1080/15459624.2013.821574>
- Yeargin, S., McKenzie, A. L., Eberman, L. E., Kingsley, J. D., Dziedzicki, D. J. et Yoder, P. (2016). Physiological and Perceived Effects of Forearm or Head Cooling During Simulated Firefighting Activity and Rehabilitation. *J Athl Train*, 51(11), 927-935. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-51.10.09>

ANNEXE A

A.I Test de prédiction de la consommation d'oxygène maximale à la marche

Pour effectuer le test, le participant était vêtu d'une tenue sportive (short, T-shirt, sous-vêtement et chaussures de sport). L'avantage de la prédiction sous-maximal à la marche de Balke réside dans le fait que la vitesse du tapis reste constante alors que l'inclinaison augmente selon le palier du test. Cela 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. Mesurer la fréquence cardiaque de repos en demandant au sujet de s'asseoir sur une chaise de laboratoire, puis, après cinq minutes, prendre la mesure de la fréquence cardiaque.
3. Instrumenter le sujet : installer le masque et le casque permettant de tenir l'embout de l'analyseur CO₂ et O₂.
4. Expliquer les techniques de marche sur tapis roulant au sujet et le laisser se familiariser avec le tapis (pente de 0 %) et le port des appareils.
5. Faire marcher le sujet à vive allure, mais à une vitesse confortable (5 km/h à 0 % d'inclinaison) durant cinq minutes. Cette phase constitue l'échauffement et elle précède le test.
6. Soumettre le sujet au test de prédiction sous-maximal par palier. Ce test consiste en 6 paliers de 3 minutes chacun, à une vitesse du tapis de 5 km/h, et avec une pente progressive du tapis, soit une pente de 3 % (1er palier), 6 % (2e palier), 9 % (3e palier), 12 % (4e palier), 15 % (5e palier) et 18 % (6e palier). Le test est terminé lorsque le participant atteint 85 % de sa fréquence cardiaque maximale prédite $[(220 - \text{l'âge}) * 85 \%]$ (ACSM – American College of Sport Medicine, 2000).
7. Réduire la pente et la vitesse du tapis roulant lorsque le test est complété afin que le sujet termine l'exercice avec une marche lente de 3 à 5 minutes pour favoriser le retour veineux et abaisser sa fréquence cardiaque à un niveau adéquat (<100 battements par minute).

Les valeurs de la fréquence cardiaque et de volume d'oxygène mesurées lors de la dernière minute de chaque palier sont moyennées. À l'aide d'une régression linéaire, les moyennes définissent la relation entre la fréquence cardiaque et la consommation d'O₂. Le volume d'oxygène (VO₂) mesuré lors de la dernière minute de chaque palier est mis en relation avec la fréquence cardiaque de la même période (Figure 22). À la fréquence

cardiaque maximale prédite du participant (220-l'âge), la valeur du VO₂ max a été extrapolée à partir de l'équation de la régression.

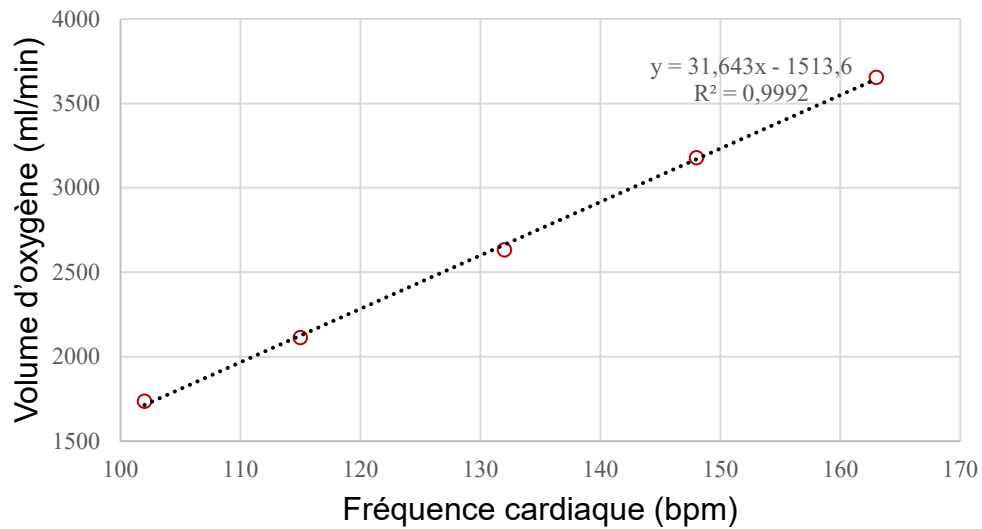


Figure 22. Exemple d'une analyse de régression entre la consommation d'oxygène et fréquence cardiaque d'un participant lors du test de la VO₂ max

ANNEXE B

B.I Procédures à suivre lors des évaluations

Préalablement à l'arrivée du sujet, plusieurs étapes devaient être complétées afin de permettre une collecte des données fiables :

1. Communiquer avec le sujet 24h à l'avance afin de s'assurer qu'il respecte les conditions préalables
2. Calibrer l'appareil de mesure de la consommation d'oxygène (Moxus) 15 minutes après le démarrage du système de pompe régulatrice de débit
3. Régler et démarrer la chambre climatique à 35 °C et 50 % d'humidité une heure avant le début des tests
4. Mettre en route les différents logiciels de cueillette de données
5. Établir la condition du jour de manière aléatoire
6. Peser le VIP
7. Activer la sonde de mesure de la température corporelle interne et la faire ingérer un participant 30 minutes avant le début du test
8. Lui faire boire 500 ml d'eau 30 min avant le début des tests
9. Effectuer la pesée des vêtements de corps qui seront portés par le participant sur une balance de précision
10. Asseoir le participant 5 minutes afin de mesurer sa fréquence cardiaque au repos
11. Permettre au participant d'aller uriner et éviter à partir de ce point la consommation d'eau et l'utilisation de la salle de bain
12. Prendre le poids du participant en sous-vêtement
13. Poser le cardiofréquencemètre et les capteurs de température externe sur le participant
14. Vérifier la température et l'humidité de la chambre climatique et noter les valeurs afin de s'assurer qu'elle respecte les valeurs 35 °C $\pm 0,5$ °C et 50 % ± 5 % d'humidité
15. Enfiler le bas de l'habit de pompier et les souliers
16. Placer le masque et le support permettant de mesurer la consommation d'oxygène du participant

17. Enfiler le haut de l'habit de pompier et le harnais de la bonbonne
18. Prendre le poids du participant avec tous les équipements
19. Ajuster la pente du tapis roulant pour obtenir un effort correspondant à 30 % de la VO_2 du participant.
20. Faire entrer le participant dans la chambre climatique, connecter les tubes de l'appareil de mesure de la consommation d'oxygène au masque du participant
21. Commencer l'acquisition des différents systèmes (Moxus, Biopac, Polar) et démarrer le tapis roulant à 5 km/h
22. Faire marcher le participant pendant 45 minutes en respectant les critères d'arrêt du test en cours
23. Demander au participant sa perception de l'effort aux 5 minutes pour les 20 premières minutes puis aux 2 min 30 secondes pour les 25 dernières minutes
24. Faire un retour au calme de 3 minutes à pente nulle et vitesse diminuée
25. Arrêter le tapis roulant
26. Sortir le participant de la chambre climatique
27. Retirer tous les équipements du participant
28. Peser le participant en sous-vêtement
29. Hydrater le participant
30. Effectuer la pesée des vêtements de corps portés par le participant sur une balance de précision
31. Peser le VIP
32. Noter les événements particuliers
33. Surveiller le participant pour un minimum de 15 minutes en ambiance contrôlée et s'assurer que les valeurs de fréquences cardiaques soient descendues près des valeurs du départ.

ANNEXE C

C.1 Grille d'appréciation du confort des VIP

Pour connaître l'appréciation subjective du confort des VIP, les participants devaient marquer d'un X le niveau qui correspondait le mieux au confort ressenti sur une échelle analogue allant de « très confortable » à « très inconfortable ». Ces appréciations ont été demandées pour cinq régions anatomiques lors de la réalisation de huit mouvements différents, en remplissant un questionnaire dont un exemple de question est présenté à la Figure 23.

Les huit mouvements (Figure 14) étaient : flexion du tronc vers l'avant, rotation du tronc vers la droite en position chevalier jambe droite fléchie à l'avant, rotation du tronc vers la gauche en position chevalier jambe gauche fléchie à l'avant, flexion des épaules (élévation des bras vers le haut), position accroupie, position agenouillée, flexion de la hanche droite et flexion de la hanche gauche.

Les 5 régions anatomiques étaient : l'épaule droite, l'épaule gauche, le cou, la poitrine, la hanche droite, la hanche gauche.

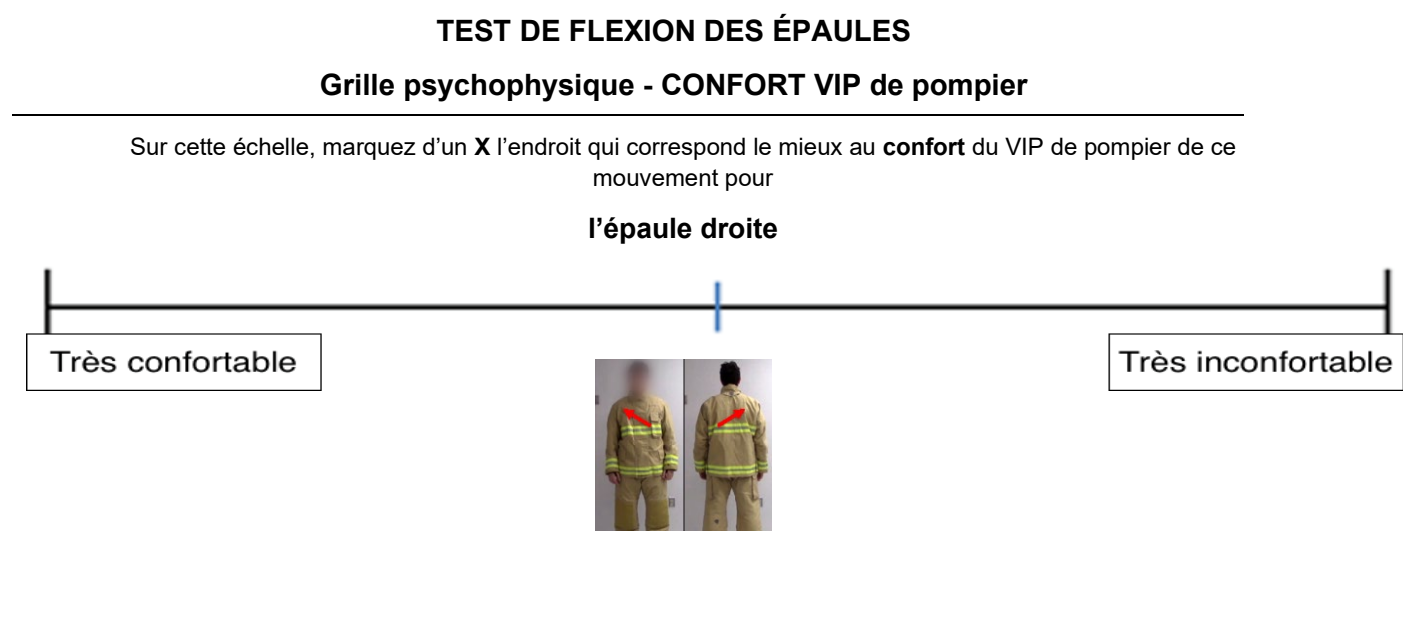


Figure 23. Exemple d'une grille psychophysique pour l'appréciation subjective du confort