

Université de Montréal

Implications thermorégulatrices et perceptuelles de la variation de la couverture d'armures de protection modulaires pendant la marche sur tapis roulant en environnement chaud

par

Audrey-Ann Bartlett

École de Kinésiologie et des Sciences de l'Activité Physique

Université de Montréal, Faculté de médecine

Mémoire présenté

en vue de l'obtention du grade de maîtrise (M.Sc.)

en Sciences de l'Activité Physique

Mai 2023

© Audrey-Ann Bartlett

Université de Montréal

Études Supérieures et Postdoctorales

Ce mémoire intitulé :

Implications thermorégulatrices et perceptuelles de la variation de la couverture d'armures de protection modulaire pendant la marche sur tapis roulant en environnement chaud.

Présenté par

Audrey-Ann Bartlett

A été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Pr Fabien Dal Maso, PhD, président-rapporteur

Pr Jonathan Tremblay, PhD, membre du jury

Pr Daniel Gagnon, PhD, directeur de recherche

## Résumé

**Introduction :** Les armures modulaires (MSA) permettent aux soldats d'ajuster le niveau de couverture de l'armure en fonction du niveau de menace. L'hypothèse émise est qu'un niveau inférieur de couverture balistique atténue les réponses physiologiques et perceptuelles pendant l'exercice à la chaleur. **Méthode :** 15 adultes (5F/10H,  $26 \pm 5$  ans,  $24,6 \pm 3,7$  kg/m<sup>2</sup>) ont marché (5 km/h, pente de 1 %) dans une chaleur sèche (38°C, 20 % humidité) pendant 1h en portant une des armure de protection : i) une couverture élevée (HC :  $0,57 \pm 0,09$  m<sup>2</sup>,  $18,5 \pm 0,3$  kg), ii) une couverture modérée (MC :  $0,44 \pm 0,07$  m<sup>2</sup>,  $18,1 \pm 0,3$  kg), iii) une couverture légère (LC1 :  $0,21 \pm 0,03$  m<sup>2</sup>,  $17,4 \pm 0,1$  kg), ou iv) une couverture légère avec une égalisation du poids à la couverture élevée (LC2 :  $0,21 \pm 0,03$  m<sup>2</sup>,  $18,6 \pm 0,2$  kg). **Résultats:** M-W pendant l'exercice ( $629 \pm 126$  W,  $p=0,30$ ), le changement de la température interne (HC :  $0,88 \pm 0,37^\circ\text{C}$ , MC :  $0,85 \pm 0,32^\circ\text{C}$ , LC1 :  $0,91 \pm 0,38^\circ\text{C}$ , LC2 :  $0,89 \pm 0,42^\circ\text{C}$ ,  $p=0,93$ ), de la fréquence cardiaque (HC :  $97 \pm 14$  bpm, MC :  $103 \pm 16$  bpm, LC1 :  $96 \pm 15$  bpm, LC2 :  $97 \pm 20$  bpm,  $p=0,08$ ), et de la production de sueur (HC :  $10,2 \pm 3,4$  g/min, MC :  $10,3 \pm 4,3$  g/min, LC1:  $9,9 \pm 4,7$  g/min, LC2 :  $10,4 \pm 4,5$  g/min,  $p=0,84$ ) n'était pas différent entre les configurations. **Conclusion:** Les armures modulaires étudiées ne minimisent pas le stress thermique ou cardiovasculaire lors d'une marche en environnement chaud et sec.

**Mots-clés :** Armure, exercice, chaleur, militaire.

## **Abstract**

**Purpose:** Modular scalable armour allows soldiers to adjust the level of armour coverage according to the threat level. We hypothesized that armour configurations with lower levels of ballistic coverage attenuate physiological and perceptual responses during exercise in the heat.

**Methods:** Fifteen adults (5 females/10 males,  $26 \pm 5$  years,  $24.6 \pm 3.7$  kg/m<sup>2</sup>) walked (5 km/h, 1% incline) in dry heat (38°C, 20% humidity) for 1h while wearing body armour that provided; i) high coverage (HC:  $0.57 \pm 0.09$  m<sup>2</sup>,  $18.5 \pm 0.3$  kg), ii) moderate coverage (MC:  $0.44 \pm 0.07$  m<sup>2</sup>,  $18.1 \pm 0.3$  kg), iii) low coverage (LC1:  $0.21 \pm 0.03$  m<sup>2</sup>,  $17.4 \pm 0.1$  kg), or iv) low coverage with weight equalization to HC (LC2:  $0.21 \pm 0.03$  m<sup>2</sup>,  $18.6 \pm 0.2$  kg). **Results:** Core temperature (T<sub>core</sub>), heart rate (HR), metabolic heat production (M-W), whole-body sweat rate (WBSR), and perceptual responses were measured. M-W during exercise ( $629 \pm 126$  W) did not differ between configurations ( $p=0.30$ ). The change in T<sub>core</sub> (HC:  $0.88 \pm 0.37^\circ\text{C}$ , MC:  $0.85 \pm 0.32^\circ\text{C}$ , LC1:  $0.91 \pm 0.38^\circ\text{C}$ , LC2:  $0.89 \pm 0.42^\circ\text{C}$ ,  $p=0.93$ ), HR (HC:  $97 \pm 14$  bpm, MC:  $103 \pm 16$  bpm, LC1:  $96 \pm 15$  bpm, LC2:  $97 \pm 20$  bpm,  $p=0.08$ ), and WBSR (HC:  $10.2 \pm 3.4$  g/min, MC:  $10.3 \pm 4.3$  g/min, LC1:  $9.9 \pm 4.7$  g/min, LC2:  $10.4 \pm 4.5$  g/min,  $p=0.84$ ) did not differ between configurations. Perceptual responses also did not differ between configurations (all  $p \geq 0.15$ ). **Conclusion:** Reducing torso ballistic armour coverage does not reduce physiological or perceptual strain during treadmill walking in dry heat.

**Key words:** Armour, exercise, heat, military, thermal.

## Table des matières

LISTE DES TABLEAUX.....	VI
LISTE DES FIGURES.....	VII
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	VIII
DÉDICACE.....	IX
REMERCIEMENTS.....	X
<b>CHAPITRE 1 – INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
1.1 MISE EN CONTEXTE .....	1
1.2 PROBLÉMATIQUE .....	1
1.3 OBJECTIF.....	2
1.4 HYPOTHÈSE .....	2
1.5 DÉFINITIONS .....	2
<i>Contrainte thermique</i> :.....	2
<i>Astreinte thermique</i> : .....	3
<i>Charge</i> .....	3
<b>CHAPITRE 2 – REVUE DE LITTÉRATURE .....</b>	<b>3</b>
2.1 THERMORÉGULATION : PRÉSENTATION DES CONCEPTS CLÉS .....	3
2.1.1. <i>Définitions</i> .....	3
2.1.2. <i>Thermolyse : une séquence de réponses autonomes bien coordonnées</i> .....	5
2.1.3. <i>L'équilibre thermique</i> .....	7
2.1.4 <i>Équilibre thermique à l'exercice</i> .....	8
2.1.5 <i>Définition des paramètres de l'équilibre thermique</i> .....	9
2.1.6- <i>Réponses cardiovasculaires lorsqu'un exercice physique est effectué en environnement chaud</i> .....	12
2.1.7- <i>Réponses perceptuelles lors d'un exercice en environnement chaud</i> .....	13
2.2 ENJEUX THERMIQUES CHEZ LES MILITAIRES.....	15
2.2.1 <i>Incidence des coups de chaleur</i> .....	16
2.2.2 - <i>Impact des vêtements</i> .....	18
2.3 IMPACT DE L'ÉQUIPEMENT ET DE LA CHARGE PORTÉE CHEZ LES MILITAIRES .....	20
2.4 LES ARMURES MODULAIRES .....	25
<b>CHAPITRE 3 – ARTICLE .....</b>	<b>33</b>
ABSTRACT .....	34
3.1 INTRODUCTION .....	35
3.2 MATERIALS AND METHODS.....	36
3.3 RESULTS .....	42
3.4 DISCUSSION .....	46
3.5 CONCLUSION .....	50
3.6 ACKNOWLEDGEMENTS .....	51
3.7 COMPETING INTERESTS STATEMENT .....	51
3.8 AUTHOR CONTRIBUTION STATEMENT.....	51
3.9 DATA AVAILABILITY STATEMENT.....	51
3.10 FUNDING STATEMENT .....	51
3.11 REFERENCES.....	52
<b>CHAPITRE 4 – DISCUSSION .....</b>	<b>54</b>
LIMITATIONS.....	57
CONCLUSION .....	58

**BIBLIOGRAPHIE .....59**  
**ANNEXE.....63**

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1.</b> Synthèse des configurations des armures utilisées dans les études antérieures.....	31
--	----

## Liste des figures

<b>Figure 1.</b> Illustration des processus physiologiques impliqués dans la thermorégulation chez l'homme.....	5
<b>Figure 2.</b> Représentation de la réponse des thermoeffecteurs en fonction de la température corporelle moyenne.....	7
<b>Figure 3.</b> Interaction du corps humain avec l'environnement pendant l'exercice.....	8

## Liste des abréviations

**BPM** : Battements par minute

**HC** : High coverage / couverture élevée

**HR** : heart rate / fréquence cardiaque

**LC** : Low coverage / couverture légère

**MC**: moderate coverage / couverture modérée

**MSA** : Modular scalable armour / armure modulaire

**M-W** : metabolic heat production / production de chaleur métabolique

**RER** : Ratio d'échange gazeux respiratoire

**Tcore** : core temperature / température corporelle centrale

**VO<sub>2</sub>max** : Consommation maximale d'oxygène

**WBSR** : whole body sweat rate / taux de sudation global

**WBGT** : Wet bulb globe temperature / température au thermomètre-globe mouillé

## Dédicace

*J'aimerais adresser cette dédicace  
À ce petit être inattendu,  
Qui est venu chambouler nos vies, pour le mieux.  
Que ces pages t'inspirent  
À poursuivre tes rêves et à te dépasser,  
Tout en te rappelant  
Que tu as le potentiel de réaliser tout ce que tu souhaites.*

*Audrey-Ann Bartlett*

## Remerciements

Il y a déjà 2 ans, alors que je pensais terminer mes études avec mon stage de fin de baccalauréat en kinésiologie au Centre ÉPIC, je n'aurais pas imaginé poursuivre mes études aux cycles supérieurs. Le domaine de la recherche a été pour moi une belle découverte. Je suis très fière de mon cheminement qui m'a permis de réaliser cet ouvrage.

J'aimerais tout d'abord remercier mon directeur de recherche, Pr Daniel Gagnon, de m'avoir offert l'opportunité de poursuivre aux cycles supérieurs, de m'avoir permis d'apprendre et de grandir dans ce nouveau milieu qu'est la recherche.

Je tiens également à remercier les membres du jury, Pr Fabien Dal Maso et Pr Jonathan Tremblay pour la lecture attentive de ce mémoire.

Merci également à la Dr Georgia Chaseling, stagiaire postdoctorale, d'avoir été pour moi un second mentor et d'avoir pris le temps de me transmettre de ses nombreuses connaissances. Je remercie également toute l'équipe du laboratoire qui m'a aidé, de proche ou de loin, à la réalisation de ce projet ainsi qu'aux nombreuses personnes qui se sont portées volontaires à la participation au projet. Sans elles, ce mémoire n'aurait pas vu le jour.

Enfin, j'aimerais souligner le soutien de mes proches ainsi que l'encouragement qu'ils m'apportent dans tout ce que j'entreprends.

# Chapitre 1 – Introduction

## 1.1 Mise en contexte

Les forces armées sont appelées en mission de plus en plus souvent dans des régions du monde où il fait chaud. Lors de ces missions, les soldats doivent performer malgré les contraintes qui leur sont imposées par l'environnement et leur équipement de protection. Chez le personnel militaire, le port d'armure de protection prédispose le soldat à un haut risque de blessures liées à la chaleur. En effet, ces armures augmentent le coût métabolique d'un effort physique et limitent les échanges de chaleur entre le corps et l'environnement, ce qui résulte en une augmentation de l'astreinte thermique et cardiovasculaire (Caldwell et al., 2011; Larsen et al., 2011; Looney et al., 2022; Taylor et al., 2016).

Certaines stratégies ont été identifiées afin de limiter l'incidence des blessures liées à la chaleur, notamment de planifier les entraînements à intensité élevée lors des moments les plus frais de la journée, de limiter le poids transporté par les soldats afin de réduire la production de chaleur métabolique et surtout de modifier l'uniforme porté afin d'améliorer les pertes de chaleur (Périard et al., 2022). C'est sur ce dernier point que ce mémoire se concentre.

## 1.2 Problématique

Les soldats déployés en mission sont appelés à transporter d'importantes charges qui peuvent limiter la capacité opérationnelle. Les armures de protection contribuent à cette charge, causent de l'insatisfaction et de nombreuses plaintes chez les soldats. Par leur poids élevé, les armures corporelles exercent une pression constante sur les épaules, et ont un impact sur la respirabilité ainsi que la mobilité. Les effets indésirables des armures de protection sont notamment exacerbés lorsque les soldats doivent effectuer leurs tâches en environnement chaud, puisqu'elles limitent, voire empêchent,

les échanges de chaleur entre le corps et l'environnement (Tack, 2018). Cela pourrait prédisposer les soldats à un haut risque de blessures liées à la chaleur et ultimement de les rendre plus vulnérables à l'ennemi. L'utilisation d'armures de protection modulaires permettant au soldat de modifier la surface de protection pourrait être une façon de diminuer le fardeau qu'imposent les équipements de protection en environnement chaud, tout en optimisant la protection ainsi que la survie des soldats. Toutefois, les effets de la modulation de la surface de protection de ces armures sur les réponses thermorégulatrices, cardiovasculaires et perceptuelles lors d'une tâche opérationnelle effectuée en environnement chaud demeurent inconnus.

### 1.3 Objectif

Ce mémoire visait à comparer les réponses thermorégulatrices, cardiovasculaires et perceptuelles lors d'une tâche physique effectuée dans un environnement chaud tout en portant une armure de protection modulaire avec trois niveaux de couverture pour une utilisation potentielle dans les Forces armées canadiennes.

### 1.4 Hypothèse

L'hypothèse suivante a été émise : la réduction de la surface de protection de l'armure modulaire diminuerait l'astreinte thermique, cardiovasculaire et perceptuelle lors de la marche en environnement chaud.

### 1.5 Définitions

Contrainte thermique :

La contrainte thermique se définit par la charge thermique qu'un individu subit par l'effet combiné de différents facteurs. Ces facteurs sont : la production de chaleur métabolique, les facteurs

environnementaux (température de l'air, humidité, vitesse de l'air et radiation thermique) et les exigences vestimentaires (Huang et al., 2020)

Astreinte thermique :

L'astreinte thermique représente les réponses physiologiques d'un individu lors d'une exposition à la chaleur, soit les réponses du corps à la contrainte thermique. Ces réponses peuvent, entre autres, être : une augmentation de la fréquence cardiaque, une déshydratation ainsi qu'une élévation de la température corporelle interne (Dessureault & Doucet, 2003).

Charge

Le concept de charge se réfère à la masse de l'armure dans le cadre de ce mémoire.

## Chapitre 2 – Revue de littérature

### 2.1 Thermorégulation : présentation des concepts clés

#### 2.1.1. Définitions

La thermorégulation représente l'ensemble des mécanismes physiologiques (autonomes) et comportementaux (volontaires) qui permettent au corps de maintenir un état d'équilibre thermique malgré les changements de température de l'environnement et/ou lors d'un effort physique (W.Larry Kenney, 2013). Ce processus de thermorégulation regroupe la thermogénèse, soit la production de chaleur du corps par l'augmentation du métabolisme cellulaire, ainsi que la thermolyse, le mécanisme de perte de chaleur qui a été produite par le corps. La thermorégulation est essentielle chez l'humain, qui est homéotherme, afin de garder une température interne stable et ainsi maintenir des fonctions physiologiques normales et permettre sa survie (Cramer et al., 2022; Taylor & Patterson, 2014; W.Larry Kenney, 2013). Au repos, le corps humain maintient sa température interne à  $37,0 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ . Un

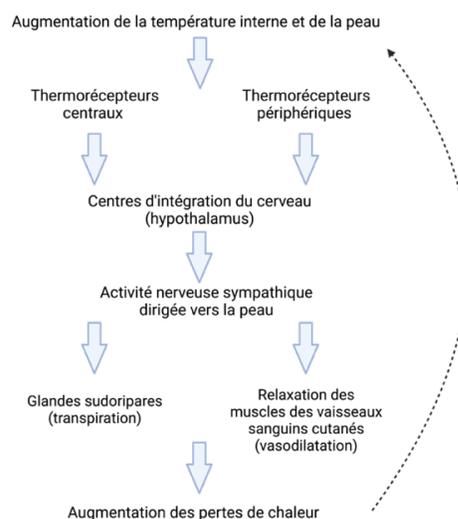
dérèglement de la thermorégulation par l'augmentation ou la diminution de la température corporelle centrale apporte des conséquences sur la santé. En effet, l'augmentation de la température corporelle augmente le risque d'hyperthermie et donc de blessures liées à la chaleur. Lorsque cette température corporelle centrale atteint plus de 40°C c'est le risque d'un coup de chaleur qui augmente, ce qui pourrait apporter de graves conséquences sur la santé et même sur la survie (Bouchama & Knochel, 2002). À l'inverse, si la température diminue en dessous de 35°C, le corps se retrouve en hypothermie, ce qui peut entraîner de la confusion et dans des cas très graves, l'arrêt cardiaque ou respiratoire (Castellani & Young, 2016).

Il existe différentes méthodes pour mesurer la température corporelle interne. Une température interne mesurée à un certain site est différente de celle mesurée à un autre site. Elles ont leurs caractéristiques et méthodes d'interprétations qui leur sont propres à chacune. La méthode choisie afin de mesurer la température interne est celle qui est la plus pratique pour le projet de recherche et la mieux adaptée à la population étudiée (Parsons, 2003). Une des méthodes fréquemment utilisée dans le contexte médical est la température orale, cependant, cette méthode peut être grandement influencée par les conditions externes, comme un environnement chaud, et elle demande d'avoir la bouche fermée durant quelques minutes, ce qui peut être difficile durant l'exercice (Parsons, 2003). Une autre méthode souvent utilisée en laboratoire est la température œsophagienne. Cette température est très précise, mais peut être inconfortable pour le participant surtout si ce dernier doit bouger, elle sera aussi affectée par la consommation de liquide (Parsons, 2003). La température rectale est également souvent utilisée en laboratoire. Cette mesure ne sera pas affectée par l'ingestion de liquide ni par l'environnement chaud, mais peut être affectée par le sang réchauffé par le mouvement des jambes durant l'exercice (Parsons, 2003). Une autre mesure fréquemment utilisée est

la température intra-abdominale. Elle est mesurée à l'aide d'une pilule télémétrique qui est ingérée par l'individu. Cette mesure n'est pas directement affectée par l'environnement et ne sera pas affectée par l'ingestion de liquide si la pilule télémétrique n'a pas été ingérée juste avant la prise de mesure. Il faut donc prévoir prendre la pilule environ 4 à 6h avant le début de l'expérimentation pour avoir une mesure valide (Parsons, 2003).

### 2.1.2. Thermolyse : une séquence de réponses autonomes bien coordonnées

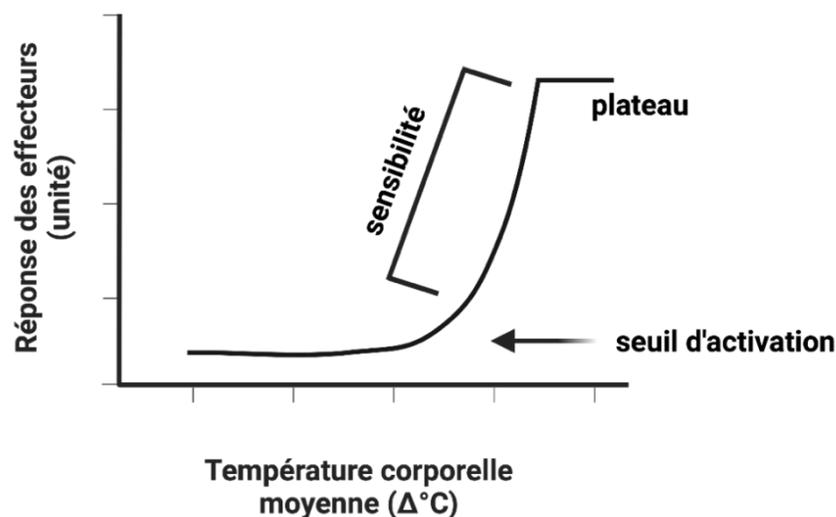
Lorsqu'il y a une augmentation de la température interne du corps, les thermorécepteurs centraux et périphériques détectent ce changement, ce qui permet l'initiation de nombreux ajustements physiologiques. Les thermorécepteurs vont acheminer l'information perçue par un influx nerveux via les nerfs périphériques pour aller vers les centres d'intégration du cerveau. Ensuite, l'hypothalamus va intégrer l'information reçue pour produire une réponse nerveuse efférente, soit par les thermorécepteurs centraux ou périphériques. Cette réponse va permettre une perte de chaleur à la périphérie par l'entremise d'une vasodilatation des vaisseaux sanguins cutanés et une perte de chaleur interne par la production de sueur des glandes sudoripares (Cramer et al., 2022; W.Larry Kenney, 2013).



**Figure 1.** Illustration des processus physiologiques impliqués dans la thermorégulation chez l'homme.

Les thermorécepteurs périphériques et centraux détectent les variations de température du corps et envoient l'information à l'hypothalamus. L'information est intégrée et entraîne en une augmentation de l'activité nerveuse sympathique vers la peau qui activera les effecteurs de la thermorégulation (transpiration et vasodilatation) et qui permettra une augmentation des pertes de chaleur.

Les réponses des thermorécepteurs pour perdre de la chaleur seront actives jusqu'à ce que l'état d'équilibre ou une réponse maximale des effecteurs (plateau dans la figure 2) est atteint. Mis à part la température interne, la température de la peau va aussi contribuer à l'activation des thermorécepteurs. Lors d'une contrainte thermique, une température chaude de la peau, combinée à une température interne élevée, va entraîner une activation plus rapide et plus importante des thermorécepteurs pour perdre de la chaleur. En revanche, si la température de la peau demeure fraîche, malgré une augmentation de la température interne, l'activation des thermorécepteurs pour les pertes de chaleur sera retardée (Cramer et al., 2022). Finalement, le muscle squelettique peut également contenir des thermorécepteurs qui envoient des signaux pendant un stress thermique, notamment durant l'activité physique. Mais il n'est pas connu si le changement de la température du muscle squelettique est une variable régulée ou auxiliaire dans le système de thermorégulation du corps humain (Cramer et al., 2022).



**Figure 2.** Représentation de la réponse des thermoeffecteurs en fonction de la température corporelle moyenne.

L'augmentation de la température corporelle moyenne se produit avant l'activation des réponses effectrices. Lorsque la température corporelle moyenne dépasse le seuil d'activation, alors les réponses effectrices s'activeront. Ces réponses augmenteront d'une façon proportionnelle à l'élévation de la température corporelle moyenne (sensibilité). Si le stimulus est soutenu, il y aura une réponse maximale des effecteurs (plateau), et ce, malgré une augmentation de la température corporelle moyenne. Figure créée grâce au logiciel BioRender.

### 2.1.3. L'équilibre thermique

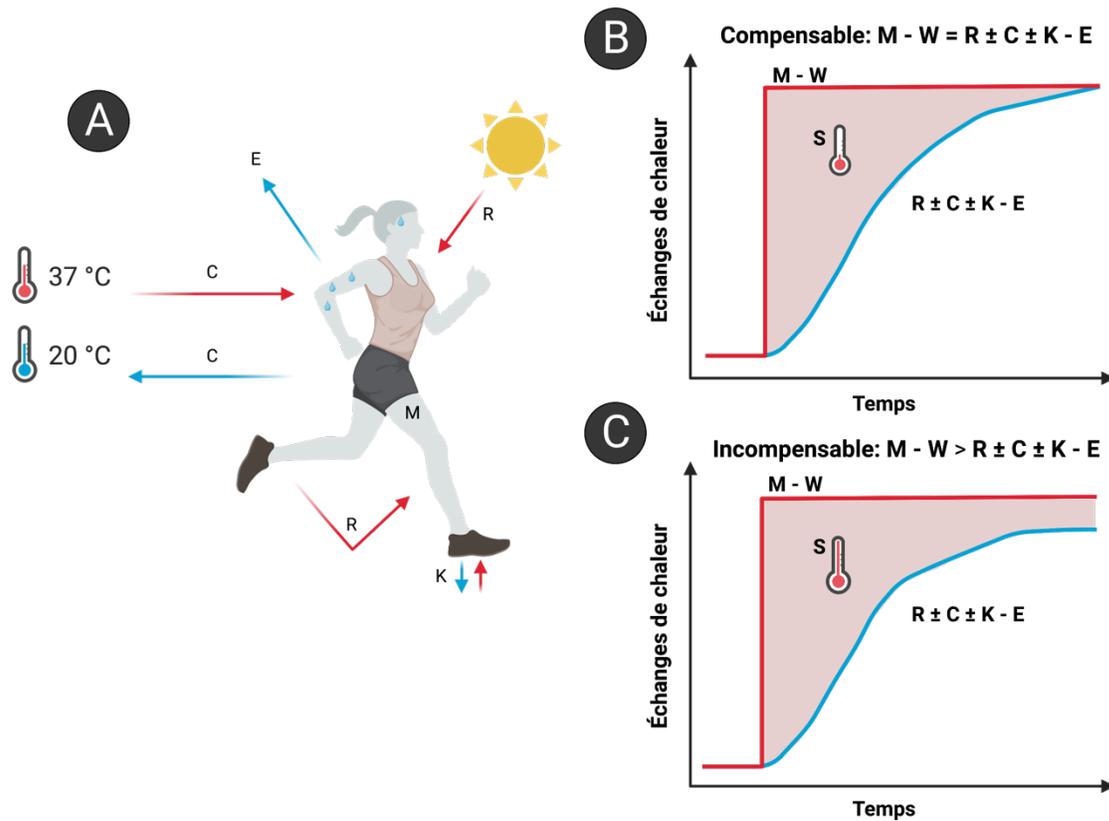
La température interne du corps humain dépend de l'équilibre entre la production de chaleur métabolique et les pertes de chaleur vers l'environnement établi par l'équation d'équilibre thermique («*heat balance equation*») (Parsons, 2003) :

$$S = M - W \pm R \pm C \pm K - E$$

Où : S est le taux net d'emmagasinage ou de perte de chaleur; M est le taux métabolique; W est le taux de travail mécanique externe; R est le transfert de chaleur par rayonnement; C représente le transfert de chaleur par convection; K est le transfert de chaleur par conduction et E est le taux de perte de chaleur par évaporation. Les valeurs sont exprimées en Watts.

Un taux d'emmagasinage de chaleur (S) (positif ou négatif) se produit lorsque l'équilibre est rompu entre la production de chaleur métabolique (M - W) et les pertes de chaleur, comme illustré dans l'image A de la figure 3. Si la production de chaleur (M - W) est égale aux pertes de chaleur ( $R \pm C \pm K - E$ ), alors il n'y aura pas d'emmagasinage ni de perte de chaleur, donc la température interne du corps demeure stable. Alors que si la température de l'air est inférieure à celle de la peau, la chaleur est perdue du corps vers l'environnement (flèches bleues dans l'image A) (Gagnon et al., 2023). Cependant, si la production de chaleur (M - W) est supérieure aux pertes de chaleur ( $R \pm C \pm K - E$ ), par exemple durant un exercice physique, ou lors d'une exposition à un environnement très chaud et humide, alors il y aura emmagasinage de chaleur et la température interne augmentera (Cramer et al.,

2022). De même que lorsque la température de l'air est supérieure à celle de la peau, la chaleur est gagnée par le corps depuis l'environnement (flèches rouges).



**Figure 3.** Interaction du corps humain avec l'environnement pendant l'exercice.

Image modifiée du Canadian Journal of Cardiology (Gagnon et al., 2023) avec permission d'Elsevier.

#### 2.1.4 Équilibre thermique à l'exercice

Sur le panneau B de la figure 3, il est possible de voir que la production de chaleur métabolique ( $M-W$ ) augmente rapidement au début de l'exercice, tandis que la perte de chaleur ( $R \pm C \pm K - E$ ) augmente plus lentement, ce qui entraîne une accumulation de chaleur dans le corps ( $S$ ). L'accumulation de chaleur dans le corps entraîne une augmentation de la température interne

(thermomètre). Un scénario de stress thermique compensable se produit lorsque la perte de chaleur est en mesure d'atteindre la production de chaleur métabolique ( $M-W = R \pm C \pm K - E$ ) ce qui résulte en une température interne élevée par rapport à la température interne de repos, mais stable. Finalement, le panneau C démontre qu'un scénario de stress thermique incompensable, qui se produit lorsque la perte de chaleur ne compense pas la production de chaleur métabolique ( $M-W > R \pm C \pm K - E$ ) ce qui provoque une augmentation continue de la température corporelle centrale et peut mener à l'hyperthermie.

Lors d'un exercice en environnement chaud, il est essentiel de limiter l'augmentation de la température corporelle centrale afin que l'exercice demeure sécuritaire. C'est l'intensité de l'exercice qui a l'effet le plus important sur le bilan thermique. La production de chaleur métabolique ( $M-W$ ) peut varier de 100 W au repos à atteindre plus de 1000 W lors d'un exercice intense (McLellan et al., 2013). Durant l'exercice ou encore lors d'une exposition à un environnement chaud, il n'est pas rare que la température corporelle centrale atteigne des valeurs de 38-40°C (Cramer et al., 2022). Même que dans le cas d'athlètes, il est courant que le corps atteigne une température corporelle centrale au-dessus de 40°C lors d'évènements compétitifs (Singh et al., 2023).

#### 2.1.5 Définition des paramètres de l'équilibre thermique

Il existe six paramètres qui peuvent affecter les variables de l'équation de l'équilibre thermique. Parmi ces six paramètres, quatre sont environnementaux (la température de l'air, la température radiante, l'humidité ainsi que la vitesse de l'air) et deux sont individuels (la production de chaleur métabolique et les propriétés des vêtements portés) (Parsons, 2003). C'est l'interaction entre ces 6 paramètres qui vont influencer la perte de chaleur du corps vers le milieu environnant. Le transfert

thermique entre l'environnement et le corps peut se produire selon quatre moyens : la radiation, la convection, la conduction ainsi que l'évaporation.

#### *2.1.5.1. La radiation*

La radiation est le transfert de chaleur par un rayonnement électromagnétique provenant d'un corps dont la température de surface est plus élevée. La quantité de transfert de chaleur par radiation va dépendre de la position et du mouvement du corps par rapport à la source de radiation. À l'extérieur, la plus grande source de chaleur rayonnante est le soleil, elle est variable selon l'heure de la journée, la saison ainsi que la présence des nuages. Dans le cas de la pratique d'exercice à l'intérieur, cette source est négligeable (Parsons, 2003).

#### *2.1.5.2. La convection*

La convection est le transfert d'énergie entre deux corps par un fluide ou un gaz en mouvement. Autrement dit, l'air ou l'eau se déplace de force vers la surface du corps et évacue ou contribue à un gain plus important de chaleur. Plus que le mouvement (vitesse) de l'air ou de l'eau est important, plus que le transfert d'énergie sera important. L'eau a un pouvoir de convection plus important que l'air, à un même volume et température, l'eau permet de gagner (ou perdre) plus de chaleur que l'air. La convection est un moyen de transfert de chaleur très efficace, car le gradient de température demeure très important entre la peau ainsi que l'air ou l'eau qui l'entoure. L'échange de chaleur se fera toujours du milieu le plus chaud vers le milieu le plus froid. Lorsque la température de l'air est inférieure à celle de la peau (~ 35°C), la chaleur est perdue du corps vers l'environnement. Lorsque la température de l'air est supérieure à celle de la peau, la chaleur est gagnée par le corps depuis l'environnement (Sokolova, 2019).

### *2.1.5.3. La conduction*

La conduction se définit par un transfert de chaleur via un contact direct avec une matière solide. Le degré de conduction va dépendre de la différence de température, du chaud vers le froid, le pourcentage de surface en contact et le type de matériaux en contact avec la peau. Cette forme de transfert de chaleur a généralement une influence négligeable sur l'état du corps entier (Parsons, 2003).

### *2.1.5.4. L'évaporation*

L'évaporation est le mécanisme selon lequel les humains perdent de la chaleur par la transpiration (sueur). Ce mécanisme permet la transformation des molécules d'eau qui sont présentes à la surface de la peau (sueur), en particules de gaz. Cette conversion s'effectue en utilisant la chaleur de la peau comme source d'énergie, ce qui explique donc son pouvoir refroidissant (Bhendura et al., 2020). La perte de chaleur par évaporation est déterminée par la différence de pression partielle de la vapeur d'eau entre la surface de la peau et l'air environnant. Il peut y avoir une résistance à cette évaporation qui est causée par les vêtements (Cramer et al., 2022). Lors de l'exercice, les pertes par évaporation représentent ~80 % des pertes totales de chaleur. L'évaporation d'un litre de sueur entraîne une perte de 680W sous forme de chaleur (Kenney et al., 2013). Seule la sueur évaporée à un effet de thermorégulation; toute sueur restante sur la peau ou qui dégoutte sur le sol ne permet pas la perte de chaleur et favorisera la déshydratation (Kenney et al., 2013).

Les échanges de perte de chaleur sont affectés par l'humidité relative de l'air ambiant, surtout pour l'évaporation. Si le degré hygrométrique est important (environnement très humide), cela signifie que l'air est saturé en vapeur d'eau et donc le gradient de pression partielle de la vapeur d'eau entre la surface de la peau et l'environnement sera faible, ce qui limite la sueur de s'évaporer (Kenney et al.,

2013). Il y aura emmagasinage de chaleur par le corps, car le corps n'arrive pas à atteindre un taux d'évaporation suffisant pour éliminer la production de chaleur métabolique. Donc la température du corps va augmenter, le stress thermique est alors insupportable (Cramer et al., 2022). À l'inverse, lorsqu'il y a un degré d'hygrométrie faible, dans un environnement sec, le gradient de pression partielle de la vapeur d'eau est élevé et l'évaporation se produit facilement, il y aura un risque de déshydratation plus important pour l'individu (Kenney et al., 2013). Lorsque la chaleur produite et/ou gagnée (par échanges sensibles dans un environnement très chaud) par le corps est égale aux pertes de chaleur par évaporation, il n'y a pas d'emmagasinage de chaleur, la température du corps reste stable et alors le stress thermique est supportable.

#### 2.1.6- Réponses cardiovasculaires lorsqu'un exercice physique est effectué en environnement chaud

Un environnement qui ne favorise pas la perte de chaleur ajoute une charge additionnelle à la production de chaleur métabolique causée par un effort physique. En effet, un effort physique ajoute une composante de production de chaleur interne qui doit être dissipée. De cette façon, les réponses thermorégulatrices sont davantage mises à contribution, comparativement à l'environnement frais et/ou sec, ce qui peut induire une compétition entre la nécessité de maintenir les fonctions de thermorégulation et le maintien d'une performance physique. Lors de l'exercice en environnement frais et/ou sec, tout comme en environnement chaud ou froid, les muscles squelettiques sollicités ont besoin d'un apport important en oxygène qui se fait, en outre, en augmentant le débit sanguin musculaire.

Lors de l'exercice en environnement chaud, le système circulatoire doit maintenant faire circuler du sang non seulement vers les muscles squelettiques, mais également vers la peau pour favoriser les échanges de chaleur vers l'environnement. Étant donné qu'il y a plus de sang qui sera dirigé vers la

peau, il y a une redistribution du sang et donc moins de sang est disponible pour les muscles squelettiques ainsi que pour les viscères (intestin, foie et reins). Les besoins de thermorégulation ont toujours avantage dans la redistribution du sang afin de protéger le corps d'une augmentation de température trop importante, ce qui pourrait être dangereux pour la santé (Kenney et al., 2013). L'augmentation du débit sanguin cutané lors d'un exercice en environnement chaud va provoquer la dérive cardiaque, soit une augmentation, plus importante qu'en environnement frais et/ou sec, de la fréquence cardiaque afin compenser une baisse du volume d'éjection systolique, car beaucoup de sang stagne en périphérie (peau) ce qui limite le retour veineux. Donc, afin que le débit cardiaque soit maintenu, la fréquence cardiaque doit augmenter. L'augmentation de la fréquence cardiaque pour compenser la diminution du volume d'éjection systolique aura cependant une certaine limite, soit la fréquence cardiaque maximale, et au-delà de celle-ci, la performance physique sera diminuée et le risque d'hyperthermie augmentera (Kenney et al., 2013).

Lorsqu'un individu effectue un exercice physique, dans un environnement chaud, le taux métabolique augmente ce qui accroît la production de chaleur. La production de chaleur métabolique lors d'une tâche physique peut représenter plus de 15 fois les valeurs au repos et dépendra de l'intensité de la tâche (Ebi et al., 2021). L'intensité de la tâche sera déterminée par les exigences de performance (marche/course, force musculaire, endurance), les contraintes environnementales (température, humidité, montées/descente de terrains) ainsi que les charges transportées (charges externes) (Orr et al., 2010).

#### 2.1.7- Réponses perceptuelles lors d'un exercice en environnement chaud

L'astreinte thermique inhérente à la contrainte thermique imposée par l'exercice à la chaleur pourrait contribuer à l'exacerbation des réponses subjectives et à un déclin de la performance

cognitive, principalement des fonctions exécutives. La performance cognitive est un aspect crucial des performances globales des soldats et leur vulnérabilité à la contrainte thermique les expose à un risque de fonctions cognitives détériorées. (Orr et al., 2010).

Une revue systématique, réalisée par Martin et al. (2019) s'est intéressée à l'impact de la chaleur sur les performances cognitives et militaires. Une trentaine d'études ont été analysées afin de pouvoir conclure que les performances cognitives sont altérées de diverses façons dépendamment de l'intensité, de la durée de l'exposition à la chaleur ainsi que de la complexité de la tâche à accomplir. Si l'exposition à la chaleur n'est pas assez intense pour qu'il ait une augmentation de la température corporelle centrale, la performance de vigilance, par des tâches de temps de réaction (attention et vitesse de traitement), n'est pas affectée ou est même améliorée. Cependant, lorsque la chaleur est combinée avec l'activité physique, ou qu'il y a une augmentation de la température corporelle centrale, il est possible d'observer une augmentation du nombre d'erreurs dans les différentes tâches (augmentation de l'impulsivité). En effet, l'inconfort lié à la chaleur, comme l'augmentation de la sensation thermique, l'altération de l'humeur ou l'augmentation de la charge de travail, diminue les ressources cognitives disponibles, ce qui va limiter les performances cognitives notamment l'attention, la vitesse de traitement, la mémoire de travail et les fonctions exécutives. Lorsque la tâche fait appel à la mémoire de travail (stockage et manipulation à court terme des informations), celle-ci sera détériorée si le stress thermique est extrême (température de 50°C ou augmentation de la température corporelle centrale de 1,5°C. L'altération s'accroît avec l'augmentation de l'astreinte thermique et/ou de la durée de l'exposition.

Un article de Schmit et al. (2017) s'est aussi intéressé aux fonctions cognitives lors de contraintes thermiques. Les auteurs se sont intéressés à la littérature portant sur les performances cognitives en conditions d'hyperthermie. Leur article a permis de démontrer qu'il existe une réponse en « U » inversé entre l'hyperthermie et les performances cognitives. Lorsque la température corporelle centrale atteint 38,5 °C, il y aura une amélioration des fonctions cognitives. Cependant, lorsque la température corporelle centrale atteint 39 °C et plus, une détérioration des fonctions cognitives commence à se faire voir.

## 2.2 Enjeux thermiques chez les militaires

Les blessures liées à la chaleur représentent l'enjeu thermique principal au sein des forces armées, en raison des efforts physiques que les soldats doivent effectuer et/ou des environnements chauds dans lesquels ils doivent parfois performer. Les blessures liées à la chaleur peuvent prendre différentes formes, du plus bénin, telles que les crampes musculaires et l'épuisement à la chaleur, au plus grave: le coup de chaleur (Périard et al., 2022; Kenney et al., 2013). Ces blessures se produisent lorsque le corps n'arrive pas à maintenir l'équilibre thermique. L'épuisement lié à la chaleur peut se manifester par des signes de fatigue extrême, d'essoufflement, d'étourdissement, de vomissement, d'une peau fraîche et moite ou d'une peau chaude et sèche, d'hypotension et d'un pouls faible et rapide (Kenney et al., 2013). En général, la température rectale ne dépassera pas 39°C lors de l'épuisement lié à la chaleur (Kenney et al., 2013).

Le coup de chaleur est une blessure liée à la chaleur qui se caractérise par une augmentation rapide de la température centrale du corps, au-dessus de 40°C et un dérèglement du système nerveux central, ce qui entraîne un comportement incohérent et une perte de connaissance (Kenney et al., 2013). Dans ce type de blessure liée à la chaleur, le système nerveux central est atteint et ne fonctionne

plus normalement (Alele et al., 2020; Bouchama et al., 2022). Des études pathologiques démontrent également des lésions au niveau des cellules endothéliales, des thromboses généralisées ainsi que de l'hémorragie dans plusieurs organes (Bouchama et al., 2022). S'il n'est pas traité rapidement, le coup de chaleur progresse vers le coma et la mort. Il existe deux types de coup de chaleur, il peut être soit classique ou encore lié à un effort physique (Alele et al., 2020; Becker & Stewart, 2011; Bouchama et al., 2022; Glazer, 2005). Le coup de chaleur classique touche plus particulièrement les personnes âgées et les personnes avec une maladie chronique lors d'une exposition passive à la chaleur. Le coup de chaleur se développera avec peu d'effort physique sur plusieurs heures ou jours (Bouchama et al., 2022). Il se produit plus souvent sous forme d'épidémie lors de vagues de chaleur et contribue à 9 à 37 % des décès liés à la chaleur durant ces périodes (Bouchama et al., 2022). Le coup de chaleur lié à un effort physique survient surtout lors d'efforts physiques intenses en environnement tempéré ou lors d'efforts physiques modérés à intense en environnement chaud et humide. Il se présente plus souvent chez les jeunes, les athlètes et les personnes en santé ou encore chez les militaires (Alele et al., 2020; Becker & Stewart, 2011; Bouchama et al., 2022). Lors d'un traitement en soins intensifs, la mortalité est de 26,5 % pour un coup de chaleur liée à un effort physique, et il atteint 63,2 % dans le cas d'un coup de chaleur classique (Bouchama et al., 2022). Ce qui différencie un coup de chaleur classique à celui lié à un effort, c'est l'augmentation de la chaleur métabolique par l'activité des muscles squelettiques qui ne serait pas suffisamment évacuée afin de prévenir une augmentation de la température corporelle centrale à un niveau critique (González-Alonso et al., 2000).

### 2.2.1 Incidence des coups de chaleur

L'incidence exacte des coups de chaleur chez le personnel militaire peut dépendre de plusieurs facteurs, qui peuvent se classer selon les facteurs de risque intrinsèques et extrinsèques. Parmi les

risques intrinsèques, il y a : les facteurs sociodémographiques (l'âge, le genre, la race, le statut matrimonial), les facteurs physiologiques et comportementaux (l'acclimatation à la chaleur, la motivation, le manque de sommeil, le niveau d'hydratation), les facteurs anthropométriques (surpoids/obésité), la condition physique, les facteurs médicaux (historique de blessures liées à la chaleur, maladie existante, prédispositions génétiques) et le mode de vie (médication, consommation de tabac ou d'alcool). Parmi les risques extrinsèques, il y a : les facteurs liés à l'entraînement (l'équipement et l'habillement), ainsi que les facteurs environnementaux (environnement chaud) (Alele et al., 2020). Plusieurs études ont permis de montrer que le coup de chaleur demeure un problème important chez les soldats. Les résultats de la revue systématique d'Alele et al. (2020) suggèrent que l'incidence des blessures liées à la chaleur dans les forces armées est très variable. Cette grande variation s'explique surtout par les différentes définitions des blessures liées à la chaleur dans les différentes études. Toutefois, il serait possible d'identifier une augmentation de l'incidence des blessures liées à la chaleur au fil des années, principalement aux États-Unis. Notons une absence de données dans la plupart des régions du monde, ce qui pourrait sous-estimer la charge réelle des blessures liées à la chaleur dans l'armée. Entre 1980 et 2002, l'étude de Carter et al. (2005) démontre qu'il y a eu 5 246 cas d'hospitalisation en lien avec une blessure liée à la chaleur dans l'armée américaine. Le nombre de cas d'hospitalisation ont été obtenu par une base de donnée: «Total Army Injury Health Outcomes Database (TAIHOD)». Parmi ces cas d'hospitalisation, 61 % étaient dus à l'épuisement lié à la chaleur alors que 18 % étaient liés au coup de chaleur et 37 individus en sont décédés (Carter et al., 2005). Dans une étude qui comparait la prévalence des coups de chaleur, mais cette fois-ci dans divers services de différentes armées, Dickinson et al. ont démontré une incidence de 72,85 années-personnes chez les militaires uniquement (Dickinson, 1994). Alors que dans l'armée américaine, la prévalence des coups de chaleur se situe à 0,67 pour 1000 années-personnes. Les recrues

avaient une prévalence plus élevée que les autres militaires, de même que les personnes de 20 ans et moins (généralement des recrues) (Périard et al., 2022). Spécifiquement chez les militaires, le désir de performer ainsi que les normes élevées que demandent les épreuves physiques causeraient de nombreuses victimes de blessures liées à la chaleur (Périard et al., 2022).

### 2.2.2 - Impact des vêtements

Les vêtements ont de nombreuses propriétés qui peuvent impacter le transfert de chaleur et d'humidité. Parmi ces propriétés, il y a l'isolation, la perméabilité à l'air et à la vapeur d'eau, la surface de couverture de la peau par le matériel, le nombre de couches de vêtement, l'absorption de l'humidité ainsi que la possibilité d'échange de rayonnement par le vêtement. Ces paramètres vont interagir avec l'environnement, selon la température, l'humidité, le vent et le rayonnement solaire ainsi qu'avec l'individu par l'activité des glandes sudoripares ainsi que le mouvement du corps (McLellan et al., 2013). L'isolation dépend des matériaux qui composent le vêtement. Plus les fibres du tissu sont rapprochées, en d'autres mots, tissés plus serrés, plus l'isolation sera élevée. L'isolation se produit en emprisonnant l'air près du corps, cette couche d'air sera réchauffée par le corps et donc permettra de diminuer les pertes de chaleur par conduction et convection (McLellan et al., 2013). La perméabilité de l'air ou de la vapeur d'eau représente la capacité d'un vêtement à laisser passer l'air, ou l'eau, au travers de celui-ci. La perméabilité de l'air permet la ventilation alors que la perméabilité à la vapeur d'eau aura un impact sur la possibilité de perdre de la chaleur par évaporation. Le nombre de couches qui composent le vêtement va également contribuer aux échanges de chaleur entre le corps et l'environnement. Plus le vêtement va se composer de nombreuses couches, plus il sera difficile de faire des échanges de chaleur avec l'environnement, car il y aura plusieurs couches d'air qui resteront emprisonnées dans le vêtement, ce qui va créer un microclimat (McLellan et al., 2013). Une étude réalisée par Teitlebaum et

al. (1972) s'est intéressée à l'effet du port de nombreuses couches sur le coût métabolique. Dans cette étude, les participants devaient marcher sur un tapis roulant à une vitesse de 5,6km/h et 8km/h pendant 20 minutes selon deux conditions. La première condition consistait à porter un ensemble de protection pour l'Arctique se composant de 5 couches de vêtements alors que la deuxième condition consistait à porter une ceinture qui représentait le poids de l'ensemble de la première condition (11,2 kg). Les résultats démontrent que le fait de porter un ensemble avec de multiples couches augmente davantage le coût métabolique d'un effort physique. En effet, le coût métabolique passait de 434,7 W (ceinture) à 513,6 W (ensemble de protection pour l'Arctique) à une vitesse de marche de 5,6km/h, alors qu'il passait de 872,7 W (ceinture) à 995,0 W (ensemble de protection pour l'Arctique) à une vitesse de 8,0 km/h.

Dans le cas d'un vêtement d'exercice en condition de chaleur, il sera conçu afin de maximiser l'évaporation rapide de la sueur, ce qui va permettre au corps de mieux thermoréguler. Si le vêtement ne permet pas l'évaporation de la sueur, une grande partie de la sueur sera absorbée par les vêtements, ce qui peut influencer le taux de transfert de chaleur et l'isolation peut être diminuée (McLellan et al., 2013). Si les vêtements sont humides (par la sueur) alors l'évaporation se fera plus loin de la peau (à partir du vêtement) et donc l'efficacité de la perte de chaleur sera diminuée (McLellan et al., 1996). Par contre, l'humidité qui demeure coincée à l'intérieur du vêtement peut provoquer un refroidissement lorsque l'intensité de l'exercice est diminuée ou cessée (McLellan et al., 2013). Le port de vêtements plus ample permet de créer des poches d'air plus grandes et ainsi pourrait permettre de favoriser les échanges de chaleur. Cependant, le port de vêtements ajoute une charge sur le corps, ce qui peut entraîner une augmentation de la production de chaleur métabolique (McLellan et al., 2013).

## 2.3 Impact de l'équipement et de la charge portée chez les militaires

Depuis de nombreuses années, les soldats transportent d'importantes charges lorsqu'ils sont déployés en mission. Les armures de protections contribuent grandement à la charge que transportent les soldats. Quoiqu'essentielles pour leur survie, les armures sont souvent source d'insatisfaction et de plaintes (Tack, 2018). Malgré le fait que la technologie se soit grandement améliorée, la charge que les soldats doivent transporter n'a pas diminuée et, au contraire, aurait même augmentée. Les nouvelles technologies incluent de nouveaux GPS, des radios, de l'équipement qui permet la vision nocturne, des détecteurs d'armes, sans oublier les batteries nécessaires au fonctionnement de chacun de ces équipements (Bossi et al., 2020) ce qui ajoute une charge supplémentaire aux soldats. Cette charge ne devrait pas représenter plus d'un tiers de leur masse corporelle (Bossi et al., 2020). La plupart des armées permettront des charges de 30 % de leur masse corporelle lors de combats, alors que cette charge sera de 45 % pour un soldat moyen lors d'une mission. La charge se compose des vêtements, de l'ensemble de protection (armure, casque), de l'équipement de combat (armes, munitions), ainsi que de l'équipement de subsistance (eau, nourriture) (Drain et al., 2012). La charge que représente cet équipement de protection peut parfois atteindre jusqu'à 54,5 kg (Orr, 2010).

Lors d'une opération se déroulant en Somalie, des soldats devaient transporter une charge allant jusqu'à 49,5 kg, la distance et la durée est cependant inconnue (Orr, 2010). Pour des soldats ayant un poids moyen de 75 kg, cela représentait 70 % de leur poids corporel. Alors que lors d'un conflit des Malouines en 1982, les Royal Marines ont transporté des charges de 54,5 à 66 kg sur une distance de 129 km. Durant d'autres opérations, cette fois en Afghanistan et en Irak, des soldats américains devaient porter entre 45,5 et 54,5 kg tout en marchant entre 10 et 15 km par jour (Orr, 2010). Il ne faut pas oublier que la charge demeure la même peu importe les différences physiques entre les soldats; la

charge demeure normalisée en fonction des exigences de la mission. La charge relative est donc beaucoup plus importante chez les soldats de plus petite taille et qui ont des capacités physiques plus faibles (Tack, 2018). L'un des effets aigus du port de charges lourdes en environnement chaud est la diminution de la capacité de travail due à l'augmentation de l'astreinte physiologique et thermique ce qui affecte les performances des soldats (Orr et al., 2010).

Une étude réalisée par Looney et al. (2022) a évalué l'effet de la charge portée par les militaires sur la demande métabolique. Les participants devaient effectuer cinq visites en laboratoire. Les deux premières visites servaient à la familiarisation et à la visite témoin. La troisième visite consistait en un test de marche progressif à différentes intensités avec port de différentes charges alors que la quatrième et cinquième visite consistait en un test qui alternait de la marche et le maintien d'une position debout tout en portant différentes charges. Lors des deux premières visites, les participants portaient un chandail et un short de sport ainsi que des souliers de sport ou des bottes de combat. Ils devaient réaliser un test progressif sur tapis roulant qui consistait à marcher pendant 3 min à une vitesse de 4,2 km/h et 0 % de pente, avec une incrémentation de 0,3 km/h/2 min. Le test prenait fin lorsque le participant rencontrait l'un de ces critères : marcher pendant 2 minutes à une vitesse de 7,1 km/h, atteindre un ratio d'échange respiratoire (RER) supérieur à 1, ou encore si le participant ne pouvait maintenir la vitesse sans courir. Lors de la troisième visite, les participants devaient compléter le même test progressif sur tapis roulant, mais cette fois en portant, dans un sac à dos, une charge de 22, 44 et 66 % de leur poids corporel, aléatoirement. Pour la quatrième visite, les participants devaient compléter cinq tests de 6 minutes à 2 reprises: maintien stationnaire d'une position debout et marche sur tapis roulant à différente vitesse (1,6km/h, 3,2km/h et 4,8 km/h ainsi que la vitesse la plus rapide que les participant a pu atteindre lors des visites 1-2) tout en portant deux charges sur les quatre

(0,22,44,66%) . Les participants avaient 2 minutes de pause entre chaque vitesse et 12 minutes de pause entre les différentes charges. Lors de la cinquième visite, les participants devaient compléter les mêmes cinq tests de 6 minutes mais avec les deux charges restantes. Les résultats montrent que la vitesse de marche des participants diminue en fonction de la charge qu'ils transportent.

L'importante charge que transporte les soldats, aura donc de nombreux effets négatifs autant sur leur bien-être physique que mental. L'augmentation du coût métabolique associé avec le port d'armure augmentera les réponses physiologiques et perceptuelles (Ricciardi et al., 2008). En effet, une augmentation de la contrainte physiologique entraînera certaines conséquences, soit une augmentation de la fatigue physique, ce qui aura un impact sur l'efficacité à effectuer les tâches requises, soit une diminution de la performance par une augmentation du temps pour effectuer une tâche car le port de charges très lourdes aura un impact sur la mobilité (Tingelstad et al., 2020). Cette charge, causée entre autres par l'armure, va réduire la mobilité et l'agilité du soldat, ce qui pourrait rendre les militaires moins efficaces lors de missions, augmenter le risque de blessures, et dans des cas plus extrêmes, causer la mort en situation de combat (Park et al., 2013). La fatigue pourrait aussi être mentale, les soldats seraient donc moins alertes et réagiraient moins rapidement dans certaines situations plus urgentes, comme lors d'une attaque, ou lors de combats. Avec une augmentation de la charge, même les tâches perceptuelles, comme la perception d'un danger, et cognitive comme retenir des consignes, seront possiblement affectées (Kobus et al., 2010). Le port de l'armure ainsi que tout l'équipement provoquera un stress physique chez les soldats notamment sur le système musculosquelettique qui pourrait se manifester par des blessures tel que des entorses, des blessures au dos ou encore des blessures plus chroniques qui impactera le soldat sur le long terme, sans oublier un risque de blessures liées à la chaleur. Par conséquent, même si un soldat court un risque élevé d'être

blessé par des tirs d'armes, le fait de maximiser son armure de protection balistique ne le protégera pas nécessairement davantage. En effet, cela augmentera la charge physique et thermique du soldat, ce qui, par temps chaud, peut entraîner une augmentation de la contrainte et donc de l'astreinte thermique qui sera non compensable. Cette fatigue et cet inconfort thermique peut également augmenter la probabilité d'exposition à l'ennemi ainsi qu'aux tirs d'armes (Tack, 2018).

Afin d'atténuer ces conséquences négatives, la charge portée par le soldat sera concentrée au niveau du torse, ce qui permet une certaine économie d'énergie par une réduction du coût métabolique comparativement à transporter une charge aux extrémités. En effet, une augmentation de la charge au niveau des pieds de seulement 100 g lors de la marche serait métaboliquement équivalent à une augmentation de la charge au niveau du torse de 1,74 kg (Taylor & Patterson, 2014). Finalement, de nouveaux matériaux ainsi que de nouvelles technologies pourraient être explorés pour permettre la réduction de la charge de l'équipement sans en diminuer son efficacité.

Une étude réalisée par Tingelstad et al. (2020) s'est intéressée aux réponses de thermorégulation et cardiovasculaires lors d'une marche en environnement chaud ou neutre avec le port d'équipement de protection. L'expérimentation se déroulait sur 3 séances : une marche sans charge additionnelle (condition de familiarisation) dans un environnement neutre (21°C, 47 % d'humidité relative), une marche avec le port d'équipement de protection en environnement neutre (21°C, 49 % d'humidité relative) ainsi qu'une marche avec le port d'équipement de protection en environnement chaud (30 °C, 46 % d'humidité relative). La marche se déroulait sur un tapis roulant à une vitesse de 5,17 km/h avec une pente de 1 %. Lors de la visite avec le port de l'équipement de protection, les participants devaient revêtir un uniforme militaire ainsi que l'armure de protection qui

pesait  $35,1 \pm 0,5$  kg. Les vingt participants se divisaient en 2 groupes, un groupe de 10 individus sans expérience (population) et un groupe de 10 individus avec expérience (réservistes dans les Forces armées canadiennes). Tous les participants ont complété la visite de familiarisation. Dans le groupe expérimenté, tous les participants ont complété la visite avec le port de l'équipement dans la condition neutre alors que 9 participants sur 10 ont complété la visite en environnement chaud. Dans le groupe sans expérience, 8 participants sur 10 ont complété la visite en environnement neutre alors que 5 participants sur 10 ont complété la visite en environnement chaud. Les participants qui n'ont pas complété la visite ont demandé l'arrêt de la séance dû à l'épuisement et à l'inconfort de l'équipement. Cette étude rapporte une fréquence cardiaque était plus élevée lors de la visite en environnement chaud comparativement à l'environnement neutre dans les 2 groupes sans différence entre les groupes : 8% plus élevé en environnement chaud dans le groupe sans expérience, 7% plus élevé en environnement chaud dans le groupe expérimenté. L'augmentation de la température de la peau était significativement plus grande lors de la visite en environnement chaud qu'en environnement neutre dans les 2 groupes : 3,7% plus élevé en environnement chaud qu'en environnement neutre pour le groupe sans expérience et 5,5% pour le groupe expérimenté. Finalement, il n'y avait pas de différence entre la perception d'effort en environnement chaud comparativement à l'environnement neutre dans les 2 groupes. Le groupe expérimenté a rapporté un effort 26% plus faible que le groupe sans expérimentation en environnement neutre et 25% plus faible en environnement chaud. L'échelle de confort thermique était plus élevée lors de la visite en environnement chaud autant dans le groupe sans expérience (34%) que dans le groupe expérimenté (47%). Il est donc possible de conclure que le port d'équipement de protection avec l'exposition à la chaleur a un effet négatif autant sur la performance (le temps), que sur les réponses de thermorégulation (température corporelle), mais aussi sur les réponses cardiovasculaires (la fréquence cardiaque).

## 2.4 Les armures modulaires

Le succès d'une mission ainsi que la survie des soldats peuvent être améliorés en augmentant la capacité de travail du soldat ou encore en limitant l'exposition à la menace. Afin d'augmenter la tolérance lors d'une tâche, la diminution de la charge de l'armure peut être envisagée, ce qui permettrait également d'améliorer l'agilité (Taylor et al., 2016). Il est évident que les armures de protection sont essentielles pour la survie des militaires. Les armures modulaires ont été développées afin d'ajuster le niveau de couverture de protection en fonction de l'analyse de la menace, mais très peu d'études ont été faites sur le port d'armures modulaires. Avoir une couverture d'armure appropriée est important puisqu'une armure trop imposante pourrait ajouter une charge non nécessaire au soldat, ce qui le rendrait moins tolérant à sa charge de travail et pourrait limiter sa mobilité. D'autre part, une réduction de la couverture de l'armure permettrait au soldat d'être plus mobile, plus rapide et limiter sa fatigue, mais pourrait aussi le rendre plus vulnérable aux projectiles et ultimement affecter sa survie (Taylor et al., 2016). Les études qui ont été faites sur les armures modulaires offraient aux soldats une diminution de la couverture tout en diminuant la charge de l'armure. Des études ont déjà montré qu'une réduction du poids de l'armure diminue les réponses physiologiques (augmentation de la température interne réduite, production de chaleur métabolique moins importante lors d'effort physique) (Taylor et al., 2016). Dans certaines situations, il peut ne pas être possible de réduire la charge de l'armure. Même lorsque la charge peut être diminuée, les soldats compensent en transportant plus de munitions ou une plus grande quantité d'eau (Bossi et al., 2020).

Une étude réalisée par Caldwell et al. (2011) a étudiée l'impact du port de différents types d'armures de protection lors d'exercices dans un environnement chaud et humide (36°C et 60% d'humidité relative). L'exercice réalisé par les participants consistait en une marche sur un tapis roulant

à une vitesse de 2,0 km/h pendant 90 minutes puis la vitesse augmentait à 4,0 km/h pour 60 minutes. Les expérimentations différaient par le type de configuration de l'armure portée par le participant. La première configuration consistait en l'uniforme de combat avec un chapeau et des souliers qui représentait une charge totale de 2,05 kg (visite contrôle). La deuxième configuration se composait de l'uniforme de combat, des souliers et avec l'ajout d'une armure de protection et un chapeau (charge totale de 8,12 kg). Finalement, la dernière configuration se composait de l'uniforme de combat, les souliers, l'armure de protection ainsi qu'un casque de protection (charge totale de 9,41 kg). Grâce à cette étude, il a été démontré que plus la charge de l'armure était importante, plus le temps pour atteindre une température interne critique (39,5°C) et plus l'épuisement dû à la chaleur se produit rapidement. La température corporelle centrale augmentait de 0,37°C à l'heure avec la configuration contrôle, de 0,41°C à l'heure avec la deuxième configuration (10,8% plus rapidement que la visite contrôle) et de 0,51°C à l'heure avec la troisième configuration (38% plus rapidement qu'avec la configuration contrôle). De plus, les pertes de chaleur par évaporation étaient diminuées avec le port de l'armure de protection.

Une étude réalisée par Heuvel et al. (2011) s'est intéressée à cinq différentes configurations d'armures variables par le poids ainsi que la couverture. La première configuration (1) représentait la condition témoin, sans port de veste de protection. La configurations 2 était une veste de 3,4 kg avec une couverture de 0,24 m<sup>2</sup> alors que la configuration 3 se composait d'une veste de 6,8 kg et d'une couverture de 0,30 m<sup>2</sup>. La configuration 4 pesait 7,8 kg et avait une couverture de 0,44 m<sup>2</sup> et finalement la configuration 5 pesait 11,0 kg et avait une couverture de 0,52 m<sup>2</sup>. L'expérimentation consistait à marcher à 4 km/h (1% de pente) pendant 90 minutes ainsi qu'à 6 km/h (4% de pente) pendant 30 minutes dans un environnement très chaud et sec (45°C et 20 % d'humidité relative). Les auteurs

soulignent que le temps à l'effort a diminué avec l'augmentation du poids de l'armure ( $p < 0,05$ ) (les temps d'efforts ne sont pas fournis dans l'article). De plus, la température corporelle interne était significativement plus élevée entre la configuration 1 ( $\sim 37,5^{\circ}\text{C}$ ) et la configuration 5 ( $\sim 38,2^{\circ}\text{C}$ ,  $p < 0,05$ ) (van den Heuvel et al., 2011).

Dans une autre étude, réalisée par Taylor et al. (2016), différentes armures et leur impact sur les réponses physiologiques ont été analysés. Cinq armures procurant différents niveaux de protection ont été étudiées dans différentes expérimentations. Les configurations d'armures différaient par leur poids et leur surface de couverture. Les participants portaient l'uniforme de combat, un casque, des souliers de course ainsi qu'une réplique d'arme dans chaque main (4,7 kg) en plus de revêtir l'une de cinq configurations de vestes de protection. La première configuration (i) ne comprenait pas d'armure de protection blindée, mais le port d'une veste qui offrait  $0,25 \text{ m}^2$  de couverture. Cette configuration représentait la condition témoin, la masse totale n'était pas spécifiée. La deuxième configuration (ii) était la plus légère des armures de protection (3,4 kg) avec la plus petite surface de protection ( $0,24 \text{ m}^2$ ). La troisième configuration (iii) avait un poids de 6,8 kg et une surface de protection de  $0,30 \text{ m}^2$  alors que la quatrième configuration (iv) pesait 7,8 kg et couvrait  $0,44 \text{ m}^2$ . Finalement, la dernière armure (v) était la plus lourde et possédait la plus grande surface de protection (11,0 kg et  $0,52 \text{ m}^2$ ). Ces charges ne représentent pas les charges réelles des vestes portées par les soldats lors de missions, car les pochettes sur les vestes, habituellement utilisées pour les munitions, étaient plutôt remplies de mousse solide. La première expérimentation consistait en une marche sur un tapis roulant à une vitesse de 4 km/h avec une pente de 1 % pendant 90 minutes, ce qui représente un exercice de patrouille chez les militaires qui nécessitait un taux métabolique d'environ 320 W (intensité faible). Ensuite, la vitesse de marche et la pente étaient augmentées à 6 km/h et 4 % respectivement pendant 30 minutes ou

jusqu'à épuisement. Cette dernière combinaison de vitesse et pente représentait un scénario d'attaque (taux métabolique d'environ 700 W, intensité élevée). L'expérimentation se déroulait dans un environnement qui représente un désert (45°C et 20% d'humidité relative). La deuxième expérimentation consistait à évaluer les mêmes configurations d'armure, mais lors de tâches de mobilité. Lors de cette expérimentation, les armures représentaient les charges réelles des vestes portées par les soldats, puisque les pochettes étaient remplies d'un poids qui représentait la charge des munitions: i) 19,1 kg, ii) 21,6 kg, iii) 25,0 kg, iv) 26,0 kg et v) 29,2 kg. Les résultats suggèrent que plus le niveau de protection augmente, plus la tolérance au travail sera réduite, soit par une diminution du temps de marche sur le tapis roulant (première expérimentation) passant de  $117,5 \pm 1,9$  minutes lors de la condition témoin (i) (avec 2 arrêts prématurés) à  $107,5 \pm 3,1$  minutes avec la configuration v) (avec 6 arrêts prématurés). De plus, la fréquence cardiaque n'était pas significative à 90 minutes entre les différentes configurations (passant de  $\sim 115$  bpm lors de la condition i) à 135 bpm lors de la condition v),  $p > 0,05$ ). Lors des épreuves de mobilité (deuxième expérimentation) une régression des charges par rapport au temps de performance a été réalisée et il était possible de voir une forte diminution relative de la performance ( $-2,12\%/kg^{-1}$ ,  $r^2=0,93$ ). Il était également possible de constater une augmentation importante de la température interne, peu importe le niveau de protection, mais cette augmentation était plus importante lorsque le poids imposé par la veste était plus grand ( $\sim 37,5^\circ C$  lors de la condition ii) comparativement à  $\sim 38,1^\circ C$  lors de la condition v) :  $p < 0,05$ ).

Une étude réalisée par Hunt et al. (2022) s'est également intéressée à l'impact de différentes armures de protection sur les réponses de thermorégulation, mais cette fois-ci sur un mannequin. Le mannequin en question permet de mesurer les échanges de chaleur. En assumant une production de chaleur métabolique et un poids corporel, il est possible de calculer le changement de température

corporelle centrale. Quatre configurations d'habits militaires ont été étudiées dans le cadre de ce projet. La première configuration représentait la condition témoin, un uniforme standard de l'armée américaine sans armure corporelle. Cette configuration (BA-0) se composait de caleçons, de bas, des bottes de combat, de lunettes de protection, d'une chemise et d'un pantalon résistant aux flammes, de gants ainsi que d'un casque de combat, pour un poids total de 2,5 kg. La deuxième configuration (BA-1) se composait de la condition témoin ainsi que d'une veste ayant une plaque balistique sur le devant et sur le dos, pour une charge totale de 10,7 kg et une couverture de 20% de la surface corporelle. La troisième configuration (BA-2) se composait également de la condition témoin ainsi que d'un gilet tactique avec une plaque balistique avant et arrière, charge de 15,2 kg et 25% de couverture de la surface corporelle. La dernière configuration (BA-3) se composait de la condition témoin ainsi que du gilet tactique avec une plaque balistique sur le devant, derrière et sur les côtés avec une protection supplémentaire au niveau de l'aîne et des deltoïdes, pour une charge de 17,9 kg et une couverture de 35 % de la surface corporelle. Le mannequin était placé dans une chambre environnementale qui simulait différentes conditions (index WBGT de 16,1°C à 33,9°C) et différentes charges de travail (légère : 300 W, modérée : 450W et élevée 600W). En débutant avec une température interne de 37°C, le temps pour atteindre une température de 38,5°C a été prédit dans les différentes conditions environnementales. Les résultats démontrent que plus la charge et la couverture de l'armure augmentent, plus que le temps pour atteindre une température corporelle centrale de 38,5°C sera diminué. Relativement à la configuration BA-0, le temps prédit requis pour atteindre une température corporelle centrale de 38,5°C pour la configuration BA-1 est réduit de 24%, alors qu'il est réduit de 26% pour la configuration BA-2. Toujours relativement à la configuration BA-0, ce temps est réduit de 30% pour la configuration BA-3. Le fait d'avoir fixé la charge de travail lors de cette étude permet d'éliminer l'effet confondant d'une charge plus élevée sur la production de chaleur métabolique, il est donc

possible d'isoler l'effet de la réduction de la surface de couverture. Toutefois, cette étude est réalisée sur des mannequins, cela justifie bien la mise en place de cette présente étude afin de valider sur des humains.

Toutes ces études ont permis de connaître l'impact d'une diminution de la charge de l'armure sur la contrainte thermique chez les soldats (Caldwell et al., 2011; Hunt et al., 2022; Taylor et al., 2016; van den Heuvel et al., 2011). Dans les quatre études, le poids de l'armure ainsi que la couverture étaient différents dans les configurations étudiées, voir tableau 1. Il est donc difficile de connaître l'impact que peut avoir une modification de la surface de couverture seulement. L'effet d'une diminution de la couverture lors d'une tâche d'intensité élevée en environnement chaud et sec demeure toujours inconnu.

**Tableau 1.** Synthèse des configurations des armures utilisées dans les études antérieures.

Auteur, année	Armures	Poids (kg)	Surface de l'armure (m <sup>2</sup> )	Surface corporelle recouverte par l'armure (%)	Résultats
Caldwell et al., 2011	Configuration 1	2,05	-	-	↑ plus rapide de la temp. interne de 0,37°C à l'heure
	Configuration 2	8,12	-	-	↑ de la temp. interne de 0,41°C à l'heure
	Configuration 3	9,41	-	-	↑ de la temp interne de 0,51°C à l'heure
Heuvel et al., 2011	Configuration 1	X	0	-	↓ du temps à l'effort avec l'augmentation du poids de l'armure (p<0,05) et augmentation de la température interne de 37,5°C pour la configuration 1 à 38,2°C pour la configuration 5.
	Configuration 2	3,4	0,24	-	
	Configuration 3	6,8	0,30	-	
	Configuration 4	7,8	0,44	-	
	Configuration 5	11,0	0,52	-	
Taylor et al., 2016	Expérimentation 1				
	Configuration i)	4,7	0,25	12	↓ de la durée de l'effort 117,5 ±1,9 min
	Configuration ii)	8,1	0,24	12	↓ de la durée de l'effort 120 min
	Configuration iii)	11,5	0,30	15	↓ de la durée de l'effort 117,5 ± 1,6 min
	Configuration iv)	12,5	0,44	22	↓ de la durée de l'effort 109,5 ± 2,9 min
	Configuration v)	15,7	0,52	26	↓ de la durée de l'effort 107,5 ± 3,1 min
	Expérimentation 2				
					↓ du temps de performance relative à la charge (-2,12%/kg <sup>-1</sup> , r <sup>2</sup> =0,93

	Configuration i)	19,1	0,25	12	
	Configuration ii)	21,6	0,24	12	
	Configuration iii)	25,0	0,30	15	
	Configuration iv)	26,0	0,44	22	
	Configuration v)	29,2	0,52	26	
Hunt et al., 2022	Configuration BA-0	2,5	-	-	↓ du temps à l'effort pour atteindre une temp. de 38,5°C
	Configuration BA-1	10,7	-	20	↓ du temps à l'effort de 24%
	Configuration BA-2	15,2	-	25	↓ du temps à l'effort de 26%
	Configuration BA-3	17,9	-	35	↓ du temps à l'effort de 30%

## Chapitre 3 – Article

### **Thermoregulatory and perceptual implications of varying torso protective armour coverage during treadmill walking in the heat**

Audrey-Ann Bartlett<sup>1,2</sup>, Georgia K. Chaseling<sup>1</sup>, Nicoleta Brodesco<sup>1,2</sup>, Amélie Debray<sup>1</sup>, Josep Iglesias-Grau<sup>1</sup>, Benjamin Pageaux<sup>2,3,4</sup>, Craig N. Burrell<sup>3</sup>, Matthew N. Cramer<sup>3</sup>, Daniel Gagnon<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Montreal Heart Institute, Montreal, QC, Canada

<sup>2</sup>École de kinésiologie et des sciences de l'activité physique, Faculté de médecine, Université de Montréal, Montreal, QC, Canada

<sup>3</sup>Centre de recherche de l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal, Montréal, QC, Canada

<sup>4</sup>Centre interdisciplinaire de recherche sur le cerveau et l'apprentissage, Montréal, QC, Canada

<sup>5</sup>Defence Research and Development Canada – Toronto Research Centre, Toronto, ON, Canada

#### **Corresponding author**

Daniel Gagnon, PhD

Centre ÉPIC, Montreal Heart Institute

5055 rue St-Zotique Est

Montréal, QC, Canada, H1T 1N6

Telephone: +1 514-374-1480 ext. 4205

Fax: +1 514-374-2445

[daniel.gagnon.3@umontreal.ca](mailto:daniel.gagnon.3@umontreal.ca)

## Abstract

Modular scalable armour allows soldiers to adjust the level of ballistic coverage according to the threat level. We hypothesized that armour configurations with lower levels of ballistic coverage would attenuate physiological and perceptual responses during exercise in the heat. Fifteen adults (5 females/10 males,  $26 \pm 5$  years) walked (5 km/h, 1% incline) in dry heat ( $38^\circ\text{C}$ , 20% humidity) for 1h while wearing body armour that provided; i) high coverage (HC:  $0.57 \pm 0.09 \text{ m}^2$ ,  $18.5 \pm 0.3 \text{ kg}$ ), ii) moderate coverage (MC:  $0.44 \pm 0.07 \text{ m}^2$ ,  $18.1 \pm 0.3 \text{ kg}$ ), iii) low coverage (LC1:  $0.21 \pm 0.03 \text{ m}^2$ ,  $17.4 \pm 0.1 \text{ kg}$ ), or iv) low coverage with weight equalization to HC (LC2:  $0.21 \pm 0.03 \text{ m}^2$ ,  $18.6 \pm 0.2 \text{ kg}$ ). Core temperature ( $T_{\text{core}}$ ), heart rate (HR), metabolic heat production (M-W), whole-body sweat rate (WBSR), and perceptual responses were measured. M-W during exercise ( $629 \pm 126 \text{ W}$ ) did not differ between configurations ( $p=0.30$ ). The change in  $T_{\text{core}}$  (HC:  $0.88 \pm 0.37^\circ\text{C}$ , MC:  $0.85 \pm 0.32^\circ\text{C}$ , LC1:  $0.91 \pm 0.38^\circ\text{C}$ , LC2:  $0.89 \pm 0.42^\circ\text{C}$ ,  $p=0.93$ ), HR (HC:  $97 \pm 14 \text{ bpm}$ , MC:  $103 \pm 16 \text{ bpm}$ , LC1:  $96 \pm 15 \text{ bpm}$ , LC2:  $97 \pm 20 \text{ bpm}$ ,  $p=0.08$ ), and WBSR (HC:  $10.2 \pm 3.4 \text{ g/min}$ , MC:  $10.3 \pm 4.3 \text{ g/min}$ , LC1:  $9.9 \pm 4.7 \text{ g/min}$ , LC2:  $10.4 \pm 4.5 \text{ g/min}$ ,  $p=0.84$ ) did not differ between configurations. Perceptual responses also did not differ between configurations (all  $p \geq 0.15$ ). Reducing torso ballistic armour coverage did not reduce physiological or perceptual strain during treadmill walking in dry heat.

**Key words:** armour, exercise, heat, military, thermal.

### 3.1 Introduction

Soldiers may be deployed to hot environments where they must perform physical tasks while wearing personal protection gear, including body armour, and carrying equipment that can represent a load in excess of 50 kg (Orr, 2010; Science and Technology Organization, 2021). Although essential for survival, body armour can exacerbate the metabolic cost of physical exertion and restricts evaporative heat loss to the environment, thereby resulting in greater thermal and cardiovascular strain (Caldwell et al., 2011; Larsen et al., 2011; Looney et al., 2000; Taylor et al., 2016). Greater thermal and/or cardiovascular strain during physical exertion may impair operational performance and raise the risk of heat-related injuries. Therefore, investigating strategies that maximize soldier survival while minimizing heat strain caused by body armour are important to optimize soldier performance and health.

To reduce the physiological burden associated with ballistic protection, modular scalable armour has been developed to adjust the level of protection coverage based on an analysis of the level of threat. By reducing armour weight and/or surface area of coverage, modular scalable armour has been proposed as one approach to reduce physiological strain in hot environments while optimizing soldier protection and survival (Billing et al., 2015; Gijsbertse et al., 2021; Larsen et al., 2011; Taylor et al., 2016). The results of a thermal manikin study demonstrate that reducing the body surface area covered by body armour (from 35% to 20%) prolongs the time to reach a critical core temperature of 38.5°C during low (300 W), moderate (450 W), and high (600 W) intensity work, with the greatest improvements occurring during moderate/heavy work in environments with a Wet Bulb Globe Temperature (WBGT) less than ~27°C (Hunt et al., 2022). To our knowledge, only one study has tested the impact of varying ballistic armour coverage on physiological strain of human volunteers exercising in the heat. Taylor *et al.* (Taylor et al., 2016) has reported that lowering ballistic armour coverage (from

0.54 m<sup>2</sup> to 0.24 m<sup>2</sup>) reduces physiological strain during low (~320 W) and heavy (~700 W) intensity exercise in a very hot and dry environment (45°C, 20% humidity). However, the reduction in armour coverage was accompanied by a reduction in armour load (from 11 kg to 3.4 kg). It is well known that armour load is the main contributor to the excess physiological strain caused by body armour (Larsen et al., 2011). In certain scenarios, it may not be possible for soldiers to reduce armour load. Even when soldiers can reduce armour load, they often compensate by carrying additional ammunition and/or water (Bossi et al., 2020). In such scenarios, it becomes important to determine if reducing the surface area of ballistic armour coverage provides a physiological and/or perceptual advantage to soldiers. If so, reducing body armour coverage could be one strategy to minimize fatigue development and enhance soldier performance in the field.

The objective of this study was to determine the impact of reducing the level of torso ballistic armour coverage, while minimizing changes in armour load, on thermoregulatory, cardiovascular, and perceptual responses during treadmill walking in dry heat. We tested the hypothesis that a lower surface area of armour coverage would decrease thermal, cardiovascular, and perceptual responses.

## 3.2 Materials and methods

*3.2.1 Ethical approval.* This study was approved by the Research Ethics and New Technologies Development Committee of the Montreal Heart Institute (approval #2022-2989), as well as the Human Research Ethics Committee of Defense Research and Development Canada (approval #2019-044). Written informed consent was obtained from all participants prior to their participation in the study.

*3.2.2 Participants.* Thirty-two individuals expressed interest in the study and were screened for potential participation: 13 declined, 2 were not eligible, and 2 were lost to follow up resulting in a final sample size of 15 participants (sex: 5 females, 10 males; age:  $26 \pm 5$  years old; height:  $173 \pm 9$  cm; weight:  $74.6 \pm 17.0$  kg; body surface area:  $1.88 \pm 0,25$  m<sup>2</sup>; VO<sub>2</sub>max:  $48.7 \pm 3.4$  mL/kg/min). Participants were mostly university students and they were not heat acclimatized. Female participants were tested irrespective of the phase of their menstrual cycle. The sample size was determined based on financial and time constraints to complete the study (Lakens, 2022). Inclusion criteria for the study were: age between 18 and 40 years, resting blood pressure <140/<90 mmHg, and being physically active (aerobic and/or resistance training  $\geq 3$  days per week). Exclusion criteria were: a diagnosis of cardiac, vascular, respiratory, neurological or metabolic disease and/or prescription of medications for the treatment of such diseases; a history of malignant hyperthermia; a history of abdominal surgery or gastro-intestinal disease; previous pelvic surgery; pregnancy for female participants.

*3.2.3 Study design.* This study used a within-participant design. Eligible participants visited the laboratory on five occasions: one preliminary visit and four laboratory visits. For all laboratory visits, participants were advised to avoid strenuous exercise at least 24 hours prior, as well as to refrain from caffeine and alcohol 12 hours prior.

*3.2.4 Preliminary visit.* Measurements of body weight and composition via bioelectrical impedance analysis (BC-418, Tanita, Arlington, IL, USA), body height, as well as resting blood pressure and heart rhythm were recorded. Participants then performed a graded maximal exercise test on a treadmill. The protocol consisted of a 2-minute rest period followed by walking at a speed of 5 km/h and 0% incline for 3 minutes. Participants then ran at a self-selected speed, while the treadmill incline

increased by 1% each minute until reaching 10%, whereupon speed or elevation increased each minute in an alternating pattern, by 0.8 km/h or 2%, respectively, until exhaustion. Respiratory gas exchanges (Quark, Cosmed, Roma, Italy) and heart rate (12-lead ECG) were measured continuously. Blood pressure by manual auscultation was measured at 2-minute intervals.

*3.2.5 Laboratory visits.* The laboratory visits were conducted in a randomized order, performed at the same time of day for a given participant, and separated by at least 48 hours. The researchers and participants were unblinded to the armour configuration that was used for each visit. Participants were instructed to ingest a telemetric pill 4 hours before arriving to the laboratory to measure core temperature. On arrival, participants provided a urine sample to measure urine specific gravity (PAL-10S, Atago, Tokyo, Japan) and weighed themselves nude in private. If urine specific gravity was  $>1.020$ , participants were asked to drink 500 mL of water before proceeding with the protocol. Participants were subsequently instrumented, donned combat clothing (long sleeve shirt and pants) and wore one of four armour configurations. The configurations differed in the surface area of torso protective coverage they provided: i) high coverage (HC:  $0.57 \pm 0.09 \text{ m}^2$ ,  $18.5 \pm 0.3 \text{ kg}$ ), representative of the current in-service configuration of the Canadian Armed Forces; ii) moderate coverage (MC:  $0.44 \pm 0.07 \text{ m}^2$ ,  $18.1 \pm 0.3 \text{ kg}$ ), achieved with a shorter cut and removing shoulder protection; iii) low coverage (LC1:  $0.21 \pm 0.03 \text{ m}^2$ ,  $17.4 \pm 0.1 \text{ kg}$ ), achieved by removing side and shoulder protection; iv) low coverage with weight equalization to the high coverage configuration (LC2:  $0.21 \pm 0.03 \text{ m}^2$ ,  $18.6 \pm 0.2 \text{ kg}$ ). The coverage for each configuration varied based on the size of the body armour vest that was fitted individually for each participant. To isolate the effect of reducing the surface area of coverage, we added weight to the LC2 configuration to ensure armour load was similar across configurations. Participants wore their own shoes. Participants were subsequently weighed and rested in a seated

position for 10 minutes while baseline measurements were recorded in a room maintained at  $\sim 22^{\circ}\text{C}$ . Participants then donned a weighted pack (10 kg), a rifle replica (2.2 kg) and a helmet ( $1.41 \pm 0.04$  kg) before entering a climate chamber maintained at  $38^{\circ}\text{C}$  and 20% relative humidity (indoor WBGT of  $26.5^{\circ}\text{C}$ ). These environmental conditions were chosen because they reflect conditions encountered during recent Canadian Armed Forces operations. Within  $\sim 2$  minutes of entering the chamber, participants began walking on a treadmill at 5 km/h with 1% incline for 1 hour or until one of the following termination criteria was reached: core temperature  $\geq 39.0^{\circ}\text{C}$ , heart rate  $\geq 95\%$  of maximum (as determined from the maximal exercise test) for 3 consecutive minutes, nausea, dizziness or volitional disengagement from the task that precluded further exercise. This exercise protocol was chosen because it reflects the physical exertion that soldiers performed during recent Canadian Armed Forces operations (Osborne et al., 2016). Core and skin temperatures as well as heart rate were measured continuously. Blood pressure was measured every 10 minutes and respiratory gas exchanges were measured for 3 minutes starting at the 15<sup>th</sup>, 35<sup>th</sup>, and 55<sup>th</sup> minute. Participants reported their perceived effort, thermal comfort, alertness, fatigue and affective responses every 20 minutes. Water (6 mL/kg) kept at  $\sim 37^{\circ}\text{C}$  (body temperature) was provided at the 20<sup>th</sup> and 40<sup>th</sup> minute of exercise to mitigate dehydration. Immediately following the end of treadmill walking, participants exited the climate chamber, were weighed and then removed the armour before sitting on a chair until core temperature decreased below  $38^{\circ}\text{C}$ . All instrumentation was then removed and participants weighed themselves nude.

*3.2.6 Physiological measurements.* Respiratory gas exchange analysis was performed with a metabolic system (Innocor, Cosmed, Concord, CA, USA). Core temperature was measured with an ingestible telemetric pill (CorTemp, HQ Inc, Palmetto, FL, USA). Wireless temperature sensors (iButtons,

Embedded Data Systems, Lawrenceburg, KY, USA) were used to measure skin temperature on the chest, shoulder, thigh, and calf. Care was taken to avoid any pressure from the vest or backpack on the sensors. Heart rate was recorded from lead II of a 5-lead ECG (Solar i8000, GE Healthcare, Boston, MA, USA). Systolic and diastolic blood pressure was measured using ECG-gated auscultation of the brachial artery (Tango M2, SunTech Medical, Morrisville, NC, USA). Body weight was measured with a platform scale (precision 0.01 kg; IND236, Mettler-Toledo, Mississauga, ON, Canada).

*3.2.7 Perceptual measurements.* Thermal comfort was measured with a 13-point scale. Participants were asked to report “how warm they feel right now” on a scale ranging from 1 (so cold I am helpless) to 13 (so hot I am sick and nauseated), with 7 being comfortable. Perception of effort was measured with the CR100 scale (Borg and Kaijser, 2006; Naidu et al., 2019). Participants were asked to report the intensity of their effort involved in the exercise, defined as “how hard, heavy and strenuous the exercise feels” on a scale ranging from 0 (nothing at all) to 100 (maximal). Arousal was measured using the Felt Arousal Scale (Svebak and Murgatroyd, 1985). Participants were asked to report “how aroused/worked-up they feel” on a scale ranging from 1 (low arousal) to 6 (high arousal). Affect was measured with the Feeling Scale (Hardy and Rejeski, 1989). Participants were asked to report “how they feel right now” on a scale ranging from -5 (feeling very bad) to +5 (feeling very good). Finally, perception of fatigue was measured using the Rating of Fatigue Scale (Micklewright et al., 2017). Participants were asked to report “how fatigued you feel right now” on a scale ranging from 0 (no fatigue at all) to 10 (total fatigue and exhaustion, nothing left).

*3.2.8 Data analyses.* Baseline data were averaged across 10 minutes, and all continuous data collected during exercise were minute-averaged. Metabolic energy expenditure was calculated from

respiratory gas exchange measurements, as previously described (Cramer and Jay, 2019). External work (in Watts) was calculated using the equation:  $9.81 \times m \times v_{tr} \times F$ , where 9.81 is gravitational acceleration in  $m/s^2$ ,  $m$  is body mass in kg,  $v_{tr}$  is treadmill belt velocity (in m/s) and  $F$  is treadmill gradient expressed as a fraction (%grade/100). Rate of metabolic heat production was subsequently calculated as metabolic energy expenditure minus external work. Mean skin temperature was expressed as a weighted average (Ramanathan, 1964): chest 30%, shoulder 30%, thigh 20%, and calf 20%. Whole body sweat rate was calculated from the change in nude body mass, accounting for fluid intake and/or urine output, and divided by the time that separated each body mass measurement.

*3.2.9 Statistical analyses.* A one-way repeated measures ANOVA with the factor of body armour configuration was used to analyze baseline values. Not all participants completed 60 minutes of exercise. Therefore, two analyses were performed on time-dependent responses during exercise. First, a mixed effects model with the factors of exercise time and body armour configuration was used to analyze time-dependent responses while accounting for missing values. Second, variables expressed as the change from baseline to the last measurement obtained during exercise were compared between body armour configurations with a one-way repeated measures ANOVA. Exercise time and whole-body sweat rate were also analyzed with a one-way repeated measures ANOVA. All data were assumed to be normally distributed. Sphericity was not assumed and a Geisser-Greenhouse correction was applied. Statistical analyses were performed with an  $\alpha$  threshold of 0.05. Multiple comparisons were adjusted using a Bonferroni correction. Effect sizes are reported as partial eta squared ( $\eta_p^2$ ). All results are reported as the mean  $\pm$  standard deviation. Statistical analyses were performed with commercially available software (Prism v9.3, GraphPad, San Diego, CA, USA).

### 3.3 Results

A detailed breakdown of load carriage is provided in Table 1. Body mass with clothing and equipment did not differ between body armour configurations ( $F_{(0.4057, 5.544)} = 4.558$ ,  $p=0.088$ ,  $\eta_p^2 = 0.250$ ). Total load carriage represented ~62% of body mass for females and ~41% of body mass for males. When considering torso armour only, it represented  $26 \pm 6\%$ ,  $26 \pm 5\%$ ,  $24 \pm 6\%$ , and  $26 \pm 6\%$  of body mass for the HC, MC, LC1 and, LC2 configurations, respectively ( $F_{(1.383, 13.83)} = 41.89$ ,  $p<0.001$ ,  $\eta_p^2 = 0.807$ ). Torso armour covered  $30 \pm 1\%$ ,  $24 \pm 1\%$ , and  $11 \pm 1\%$  for the HC, MC, and LC1/LC2 configurations, respectively ( $F_{(1.552, 21.73)} = 4609$ ,  $p<0.001$ ,  $\eta_p^2 = 0.997$ ).

**Table 1.** Load carriage during exercise in a hot environment while wearing varying torso protective coverage.

	Armour configuration				p value
	HC	MC	LC1	LC2	
Nude weight (kg)	74.25 ± 16.72	74.08 ± 16.38	73.73 ± 16.35	74.12 ± 16.63	0.309
Armour (kg)	18.53 ± 0.34	18.12 ± 0.31	17.39 ± 0.14	18.61 ± 0.20	<0.001
Backpack (kg)	10 ± 0	10 ± 0	10 ± 0	10 ± 0	-
Helmet and rifle (kg)	1.41 ± 0.04	1.41 ± 0.04	1.41 ± 0.04	1.41 ± 0.04	-
Armour and equipment (kg)	29.94 ± 0.37	29.53 ± 0.34	28.81 ± 0.17	30.02 ± 0.22	<0.001
Total load (kg)	105.86 ± 16.90	105.81 ± 16.88	104.80 ± 16.77	105.46 ± 17.36	0.071

Values are mean ± SD for n=15. HC, high coverage; MC, moderate coverage; LC1, low coverage; LC2, low coverage with weight equalization. p value is for the main effect of a one-way repeated measures ANOVA.

Exercise time and end-exercise physiological responses are provided in Table 2. Not all participants were able to complete 60 minutes of exercise; 12/15 participants (2 females/10 males) completed 60 minutes while wearing at least 1 body armour configuration. Amongst these participants, 5/12 (1 female) completed 60 minutes with all 4 body armour configurations. Of the participants who could not complete 60 minutes of exercise, 1 participant reached  $\geq 95\%$  of maximum heart rate, 1 reached a core temperature  $\geq 39.0^\circ\text{C}$  and all others stopped due to volitional exhaustion. Exercise time did not differ between body armour configurations ( $F_{(2.157, 30.19)} = 1.588$ ,  $p=0.219$ ,  $\eta_p^2 = 0.102$ ). The change from baseline to end-exercise in core temperature ( $F_{(2.211, 30.96)} = 0.084$ ,  $p=0.934$ ,  $\eta_p^2 = 0.006$ ),

mean skin temperature ( $F_{(2.253, 31.55)} = 0.206$ ,  $p=0.839$ ,  $\eta_p^2 = 0.014$ ), and heart rate ( $F_{(1.937, 27.12)} = 2.835$ ,  $p=0.078$ ,  $\eta_p^2 = 0.168$ ) did not differ between body armour configurations.

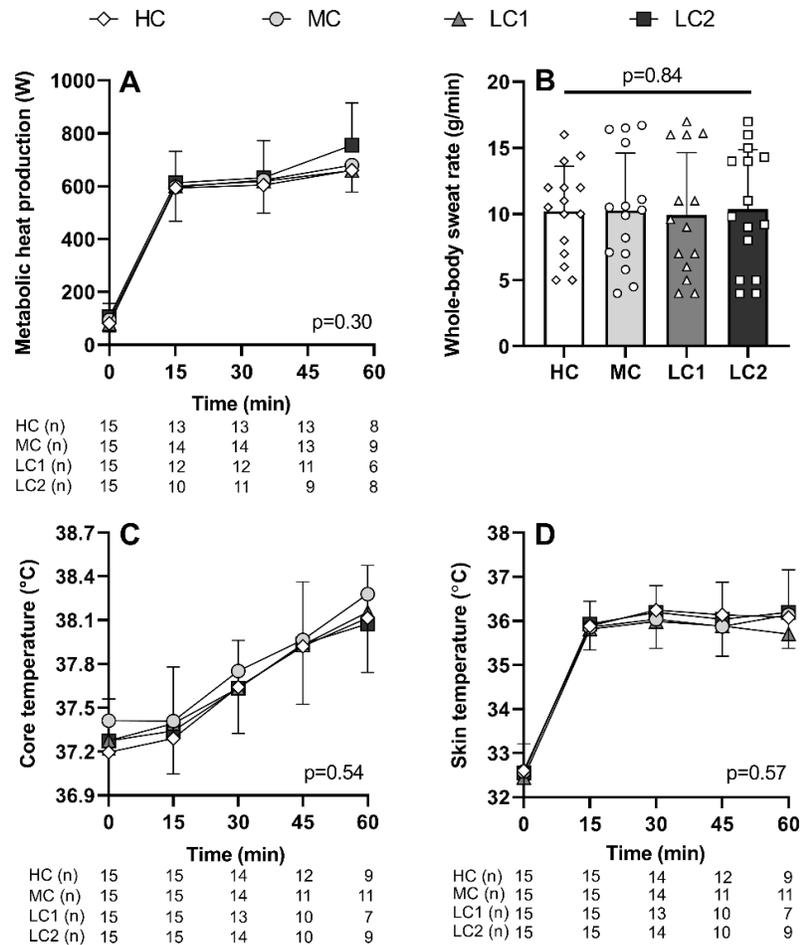
**Table 2.** Exercise time and end-exercise physiological variables during exercise in a hot environment while wearing varying torso protective coverage.

Level of torso coverage	Baseline	End-exercise	Change
<i>Exercise time (min)</i>			
High coverage	-	51 ± 13	-
Medium coverage	-	53 ± 13	-
Low coverage	-	48 ± 15	-
Low coverage with weight equalization	-	51 ± 14	-
<i>Core temperature (°C)</i>			
High coverage	37.20 ± 0.26	38.14 ± 0.29	0.88 ± 0.37
Medium coverage	37.41 ± 0.23	38.26 ± 0.50	0.85 ± 0.32
Low coverage	37.27 ± 0.41	38.18 ± 0.39	0.91 ± 0.38
Low coverage with weight equalization	37.27 ± 0.29	38.16 ± 0.45	0.89 ± 0.42
<i>Mean skin temperature (°C)</i>			
High coverage	32.60 ± 0.58	36.39 ± 0.64	3.79 ± 0.71
Medium coverage	32.58 ± 0.65	36.26 ± 0.73	3.68 ± 0.60
Low coverage	32.44 ± 0.54	36.07 ± 0.63	3.63 ± 0.72
Low coverage with weight equalization	32.55 ± 0.67	36.23 ± 0.81	3.68 ± 0.79
<i>Heart rate (beats/min)</i>			
High coverage	69 ± 12	167 ± 19	97 ± 14
Medium coverage	70 ± 10	173 ± 19	103 ± 16
Low coverage	68 ± 13	164 ± 21	96 ± 15
Low coverage with weight equalization	71 ± 12	168 ± 19	97 ± 20

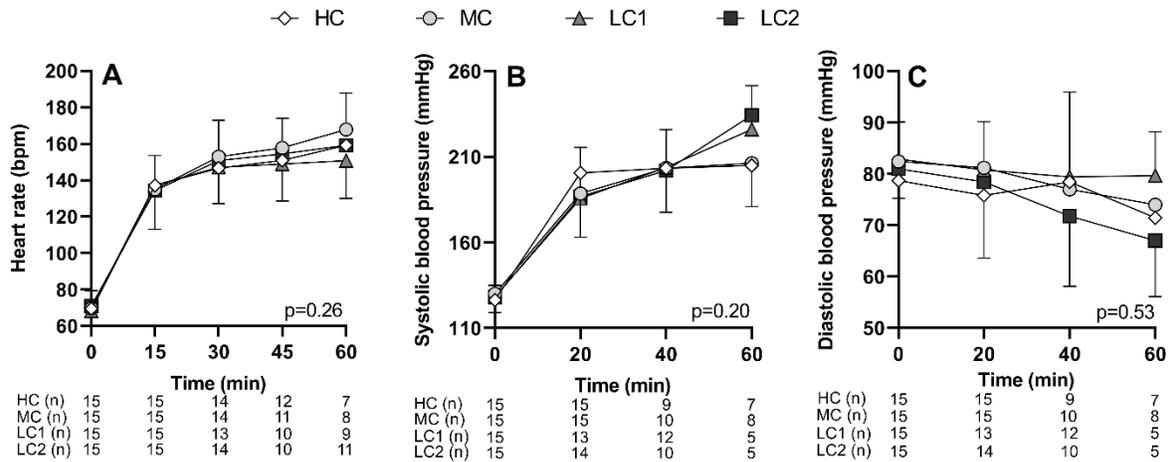
Values are mean ± SD for n=15.

Time-dependent changes in thermal, cardiovascular, and perceptual responses are presented in Figures 1, 2, and 3, respectively. During exercise, metabolic heat production (time × armour interaction,  $F_{(0.634, 4.711)} = 1.180$ ,  $p=0.295$ ,  $\eta_p^2 = 0.137$ ), core temperature (time × armour interaction,  $F_{(2.690, 25.33)} = 0.719$ ,  $p=0.536$ ,  $\eta_p^2 = 0.071$ ), mean skin temperature (time × armour interaction,  $F_{(2.033, 20.49)} = 0.578$ ,  $p=0.572$ ,  $\eta_p^2 = 0.054$ ), heart rate (time × armour interaction,  $F_{(3.460, 34.89)} = 1.399$ ,  $p=0.258$ ,  $\eta_p^2 = 0.122$ ), and systolic blood pressure (time × armour interaction,  $F_{(3.334, 25.56)} = 1.662$ ,  $p=0.197$ ,  $\eta_p^2 = 0.178$ ) increased, but values did not differ between body armour configurations. Diastolic blood pressure (time × armour interaction,  $F_{(2.010, 15.41)} = 0.659$ ,  $p=0.531$ ,  $\eta_p^2 = 0.079$ ) decreased during exercise but did not

differ between body armour configurations. Whole-body sweat rate did not differ between body armour configurations ( $F_{(1.794, 24.52)} = 0.151, p=0.839, \eta_p^2 = 0.01$ ).

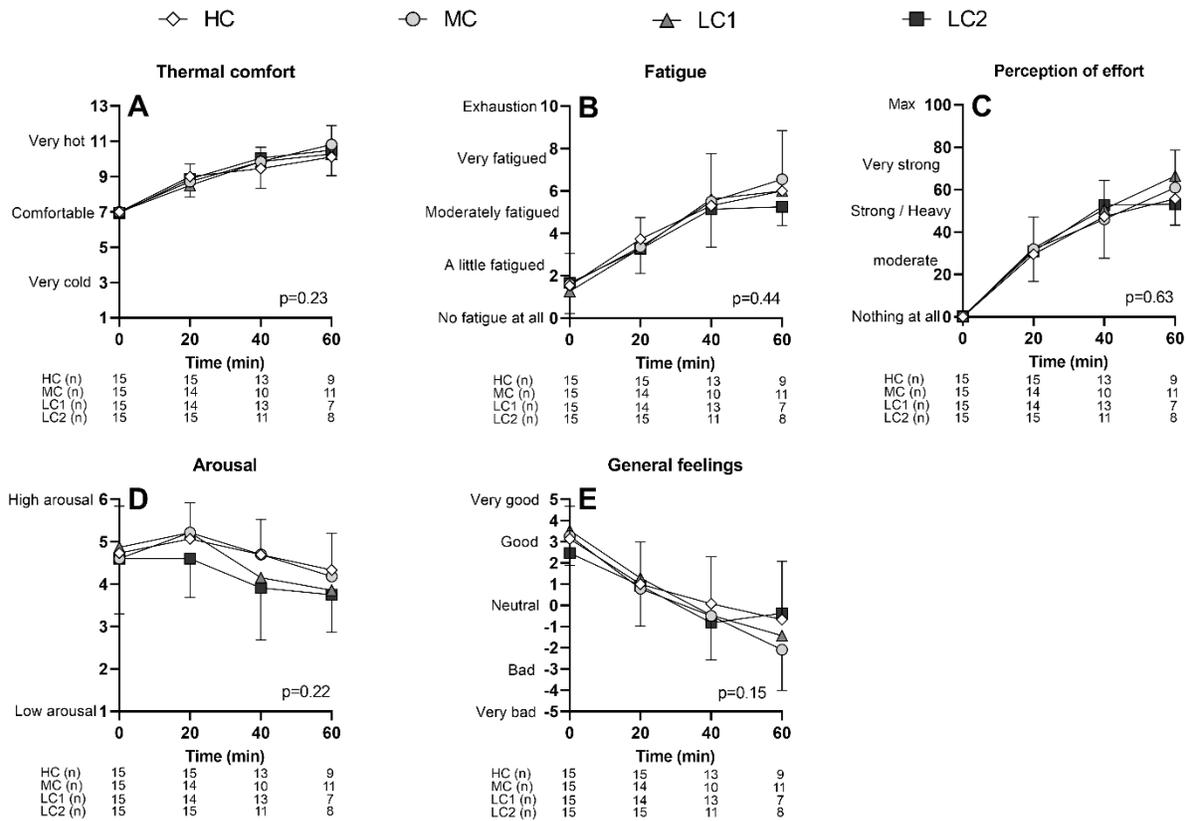


**Figure 1. Thermoregulatory responses during treadmill walking in a hot environment while wearing varying levels of torso protective coverage.** Metabolic heat production (panel A), whole-body sweat rate (panel B), core temperature (panel C), and mean skin temperature (panel D) during 60 minutes of exercise while wearing torso armour that provides: high coverage (HC:  $0.57 \pm 0.09 \text{ m}^2$ ,  $18.5 \pm 0.3 \text{ kg}$ ), moderate coverage (MC:  $0.44 \pm 0.07 \text{ m}^2$ ,  $18.1 \pm 0.3 \text{ kg}$ ), low coverage (LC1:  $0.21 \pm 0.03 \text{ m}^2$ ,  $17.4 \pm 0.1 \text{ kg}$ ), or low coverage with weight equalization to the high coverage configuration (LC2 :  $0.21 \pm 0.03 \text{ m}^2$ ,  $18.6 \pm 0.2 \text{ kg}$ ). Values are mean  $\pm$  SD. Data were analyzed with a mixed effects model for an initial sample size of  $n=15$ . Actual  $n$  at each timepoint is indicated below the x axis. The  $p$  values are those of the body armour  $\times$  exercise time interaction.



**Figure 2. Cardiovascular responses during treadmill walking in a hot environment while wearing varying levels of torso protective coverage.** Heart rate (panel A), systolic blood pressure (panel B), and diastolic blood pressure (panel C) during 60 minutes of exercise while wearing torso armour that provides: high coverage (HC:  $0.57 \pm 0.09$  m<sup>2</sup>,  $18.5 \pm 0.3$  kg), moderate coverage (MC:  $0.44 \pm 0.07$  m<sup>2</sup>,  $18.1 \pm 0.3$  kg), low coverage (LC1:  $0.21 \pm 0.03$  m<sup>2</sup>,  $17.4 \pm 0.1$  kg), or low coverage with weight equalization to the high coverage configuration (LC2 :  $0.21 \pm 0.03$  m<sup>2</sup>,  $18.6 \pm 0.2$  kg). Values are mean  $\pm$  SD. Data were analyzed with a mixed effects model for an initial sample size of n=15. Actual n at each timepoint is indicated below the x axis. The p values are those of the body armour  $\times$  exercise time interaction.

Participants felt hotter, felt less comfortable, were more fatigued, and perceived more exertion during exercise compared to baseline whereas arousal and affect decreased (all  $p < 0.001$ ). There were no differences in any of these perceptual responses between body armour configurations : thermal comfort (time  $\times$  armour interaction,  $F_{(3.178, 30.37)} = 1.517$ ,  $p = 0.229$ ,  $\eta_p^2 = 0.137$ ), fatigue (time  $\times$  armour interaction,  $F_{(3.731, 35.65)} = 0.959$ ,  $p = 0.437$ ,  $\eta_p^2 = 0.091$ ), perception of effort (time  $\times$  armour interaction,  $F_{(3.331, 31.83)} = 0.603$ ,  $p = 0.635$ ,  $\eta_p^2 = 0.059$ ), arousal (time  $\times$  armour interaction,  $F_{(2.726, 26.05)} = 1.593$ ,  $p = 0.217$ ,  $\eta_p^2 = 0.143$ ) and general feelings (time  $\times$  armour interaction,  $F_{(3.310, 31.63)} = 1.878$ ,  $p = 0.149$ ,  $\eta_p^2 = 0.164$ ).



**Figure 3. Perceptual responses during treadmill walking in a hot environment while wearing varying levels of torso protective coverage.** Thermal comfort (panel A), fatigue (panel B), perception of effort (panel C), arousal (panel D), and affect (panel E) during 60 minutes of exercise while wearing torso armour that provides: high coverage (HC:  $0.57 \pm 0.09 \text{ m}^2$ ,  $18.5 \pm 0.3 \text{ kg}$ ), moderate coverage (MC:  $0.44 \pm 0.07 \text{ m}^2$ ,  $18.1 \pm 0.3 \text{ kg}$ ), low coverage (LC1:  $0.21 \pm 0.03 \text{ m}^2$ ,  $17.4 \pm 0.1 \text{ kg}$ ), or low coverage with weight equalization to the high coverage configuration (LC2 :  $0.21 \pm 0.03 \text{ m}^2$ ,  $18.6 \pm 0.2 \text{ kg}$ ). Values are mean  $\pm$  SD. Data were analyzed with a mixed effects model for an initial sample size of  $n=15$ . Actual  $n$  at each timepoint is indicated below the x axis. Values are mean  $\pm$  SD. Data were analyzed with a mixed effects model for an initial sample size of  $n=15$ . The p values are those of the body armour  $\times$  exercise time interaction.

### 3.4 Discussion

Body armour is essential for soldier survival but remains problematic for operational capability. Body armour notably exacerbates the metabolic cost of physical exertion and therefore metabolic heat production, and likely impedes evaporative heat loss to the environment predisposing to greater heat strain and risk of heat illness. The current study examined the impact of varying the level of torso armour coverage on thermoregulatory, cardiovascular, and perceptual responses during a physical task performed in a hot environment. The main finding is that reducing the surface area of torso armour

coverage did not reduce thermal, cardiovascular, or perceptual responses during treadmill walking in dry heat. These results suggest that the modular scalable armour configurations studied may not offer a physiological or perceptual advantage for soldier operational capability during physical work performed in a hot and dry environment.

At first glance, the current results do not agree with previous human physiological (Taylor et al., 2016) and thermal manikin (Hunt et al., 2022) studies that tested the effect of reduced armour coverage on physiological strain. However, in the human physiological study (Taylor et al., 2016), the reduction in armour coverage (0.54 m<sup>2</sup> to 0.24 m<sup>2</sup>) was accompanied by an ~8 kg reduction in armour load. Since it is well known that armour load is the main determinant of the additional physiological strain associated with wearing body armour (Larsen et al., 2011), the lower armour load likely explains why thermal strain was reduced while wearing the armour configuration with a lower coverage. In the thermal manikin study (Hunt et al., 2022), reducing the body surface area covered by body armour from 35% to 20% was modeled to prolong the time to reach a critical core temperature of 38.5°C, but this effect was most pronounced when moderate/heavy work was simulated in environments with a WBGT less than ~27°C. At the combination of work intensity (~630 W) and environmental conditions (WBGT of 26.5°C) employed in the current study, the thermal manikin study suggests that the difference in time to reach a critical core temperature of 38.5°C appears negligible when reducing the body surface area covered by body armour from 35% to 20% (Hunt et al., 2022). Therefore, the current results support this previous analysis.

Thermal strain during exercise is dictated by the imbalance between metabolic heat production and heat loss. Due to the well known metabolic burden of body armour (Caldwell et al., 2011), we

studied armour configurations with minor differences in weight (<1 kg). Although armour weight statistically differed between configurations, there were no differences in metabolic heat production between armour configurations which allowed us to isolate the potential effect of reduced torso coverage on thermal strain. Considering that ambient temperature (38°C) was above mean skin temperature (~36°C), any reduction in thermal strain would have therefore occurred through improved evaporative heat loss. Accordingly, the hypothesis that lowering the surface area of torso armour coverage would reduce physiological and perceptual strain during exercise was based on the premise that less torso coverage may allow for greater evaporative heat loss to the environment. In contrast to our hypothesis, lowering torso protective coverage did not minimize thermal strain and whole-body sweat rate did not differ between body armour configurations, suggesting that reducing the level of torso protective coverage does not allow for a greater proportion of the sweat secreted to evaporate (i.e. sweating efficiency). This could be due to an insufficient reduction in torso coverage (from ~0.65 m<sup>2</sup> to 0.17 m<sup>2</sup> or 30% to 11% of body surface area) to meaningfully improve evaporative heat loss and/or that any reduction in torso coverage is outweighed by the relatively impermeable military clothing worn beneath the armour (Taylor and Patterson, 2014). It should be noted that the metabolic heat production that was sustained during exercise (~630 W) would be characterized as heavy work and would necessitate the implementation of a work/rest cycle (Sawka and Pandolf, 2001). Therefore, it is possible that participants experienced an uncompensable heat stress scenario. If so, any additional evaporation afforded by a reduced surface area of torso ballistic coverage may have been insufficient to meaningfully minimize heat imbalance.

The body armour configurations studied also did not minimize perceptual responses during walking exercise in the heat. Thermal and cardiovascular strain during exercise in the heat amplify

perceptual responses (Périard et al., 2011), including thermal discomfort and perceived exertion that may ultimately reduce physical and/or cognitive performance (Flouris and Schlader, 2015). Since physiological strain did not differ between body armour configurations, this may explain the lack of difference in perceptual strain. Nonetheless, reducing the level of torso armour coverage could have decreased perceptual strain by reducing the physical discomfort associated with body armour (Attwells et al., 2006; Knapik et al., 1996; Park et al., 2013). However, as discomfort is likely to alter affective responses during exercise, the lack of differences in reported affective responses between body armour conditions suggests that discomfort did not differ between configurations. Nonetheless, we did not quantify discomfort and future studies should investigate the impact of reducing the level of torso armour coverage on comfort. Such information could provide further information on the potential implementation of new body armours.

*3.4.1. Limitations.* The results are specific to the modular scalable armour configurations studied. We cannot not rule out the possibility that other configurations may reduce physiological or perceptual responses if they achieve a greater reduction in torso coverage or, perhaps most importantly, they are lighter and therefore reduce the metabolic cost of physical exertion (Taylor et al., 2016). The results are also specific to the relatively high metabolic heat production, the hot/dry conditions employed, and the short exercise duration. We cannot rule out the possibility that the armour configurations studied may reduce physiological and/or perceptual responses during lower intensity exercise and/or in cooler environments (Hunt et al., 2022), and/or that reduced physiological/perceptual strain may only become evident during more prolonged exercise. The participants recruited for this study were not trained military personnel, which may explain the low proportion of participants who completed the full 60 minutes of treadmill walking. The mean level of

fitness, as quantified by maximum oxygen consumption, of the participants recruited for the current study ( $48.7 \pm 3.4$  mL/kg/min) is greater than that of Canadian Armed Forces personnel ( $45.9 \pm 7.0$  mL/kg/min) (Canadian Forces Morale & Welfare Services, 2019-2020). Although trained military personnel may have been able to complete the 60-minute exercise period with lower levels of perceptual strain, it seems unlikely that reducing the level of torso armour coverage would have lowered physiological strain within this population.

*3.4.2 Perspectives.* Load carriage exacerbates the physical burden experienced by dismounted soldiers, especially for soldiers who must perform physical task in a hot environment. Although it is well known that reducing armour load reduces physiological strain during exercise in the heat, there are scenarios in which soldiers may not be able to reduce load carriage. This study shows that reducing the level of torso ballistic coverage within a modular scalable armour does not reduce thermal, cardiovascular, or perceptual responses during walking exercise in a hot and dry environment. To potentially minimize physiological and/or perceptual responses, future modular scalable armour designs should consider further reducing torso armour coverage, using alternative materials that favor evaporative heat loss and/or use lighter materials that reduce the metabolic cost of physical exertion.

### 3.5 Conclusion

The current study shows that reducing torso armour coverage by ~60% (from ~0.65 to 0.17 m<sup>2</sup>) does not affect thermal (core and skin temperatures), cardiovascular (heart rate) or perceptual (thermal comfort, fatigue, perceived exertion, arousal, general feelings) strain during treadmill walking in dry heat. These results suggest that reducing the level of torso armour coverage may be insufficient to offer a physiological or perceptual advantage to soldier operational capability in hot and dry environments.

### 3.6 Acknowledgements

The authors thank Laurence Garceau, Charles Desrosiers-Gagnon, Hans Donacin, Jade Paul, Julie Lalongé and Hadiatou Barry who helped with data collection, as well as all the participants who volunteered for this study.

### 3.7 Competing interests statement

The authors declare there are no competing interests.

### 3.8 Author contribution statement

AAB contributed to investigation, formal analysis, project administration, visualization, and writing - original draft. GKC contributed to conceptualization, methodology, funding acquisition, investigation, project administration and writing – review & editing. NB contributed to investigation and writing – review & editing. AD contributed to investigation and writing – review & editing. JIG contributed to supervision and writing – review & editing. BP contributed to methodology and writing – review & editing, CNB contributed to conceptualization, methodology, and writing – review & editing. MNC contributed to conceptualization, methodology, resources and writing – review & editing. DG contributed to conceptualization, funding acquisition, methodology, project administration, supervision, writing – review & editing.

### 3.9 Data availability statement

The original data from this work are available upon request to the corresponding author.

### 3.10 Funding statement

This study was funded by the Canadian Institute for Military and Veteran Health Research and Defense Research and Development Canada.

### 3.11 References

- Attwells, R.L., Birrell, S.A., Hooper, R.H., Mansfield, N.J., 2006. Influence of carrying heavy loads on soldiers' posture, movements and gait. *Ergonomics* 49, 1527-1537.
- Billing, D.C., Silk, A.J., Tofari, P.J., Hunt, A.P., 2015. Effects of Military Load Carriage on Susceptibility to Enemy Fire During Tactical Combat Movements. *J. Strength Cond. Res.* 29 Suppl 11, S134-138.
- Borg, E., Kaijser, L., 2006. A comparison between three rating scales for perceived exertion and two different work tests. *Scand. J. Med. Sci. Sports* 16, 57-69.
- Bossi, L., Tack, D., Karakolis, T., Keefe, A., Jones, M., 2020. Chapter 6: Rationalizing the approach to mitigate soldier physical burden. Are Ironman or Captain America our Magic Bullet. In *Transhumanizing War: Performance Enhancement and the Implications for Policy, Society, and the Soldier*. McGill-Queen's University Press. ISBN: 9180773559486, Pages 119–151.
- Caldwell, J.N., Engelen, L., van der Henst, C., Patterson, M.J., Taylor, N.A., 2011. The interaction of body armor, low-intensity exercise, and hot-humid conditions on physiological strain and cognitive function. *Mil. Med.* 176, 488-493.
- Canadian Forces Morale & Welfare Services, 2019-2020. Predicted VO<sub>2</sub>max data from the Army's FORCE test for troops aged 18-40 years. Available from: <https://formefitreporting.cfmws.com/>. Last accessed September 20<sup>th</sup> 2022.
- Cramer, M.N., Jay, O., 2019. Partitional calorimetry. *J Appl Physiol* 126, 267-277.
- Flouris, A.D., Schlader, Z.J., 2015. Human behavioral thermoregulation during exercise in the heat. *Scand. J. Med. Sci. Sports* 25 Suppl 1, 52-64.
- Gijsbertse, K., Linssen, L., Woering, A., Catoire, M., 2021. The effects of mass, bulk and stiffness of personal protective equipment and clothing on physical performance when performing a military mobility obstacle course. *Appl. Ergon.* 95, 103448.
- Hardy, C.J., Rejeski, W.J., 1989. Not What, but How One Feels: The Measurement of Affect during Exercise. *J. Sport. Exerc. Psychol.* 11, 304-317.
- Hunt, A.P., Potter, A.W., Linnane, D.M., Xu, X., Patterson, M.J., Stewart, I.B., 2022. Heat Stress Management in the Military: Wet-Bulb Globe Temperature Offsets for Modern Body Armor Systems. *Hum. Factors* 64, 1306-1316.
- Knapik, J., Harman, E., Reynolds, K., 1996. Load carriage using packs: a review of physiological, biomechanical and medical aspects. *Appl. Ergon.* 27, 207-216.
- Lakens, D., 2022. Sample Size Justification. *Collabra: Psychology* 8, 33267.
- Larsen, B., Netto, K., Aisbett, B., 2011. The effect of body armor on performance, thermal stress, and exertion: a critical review. *Mil. Med.* 176, 1265-1273.

- Looney, D.P., Lavoie, E.M., Vangala, S.V., Holden, L.D., Figueiredo, P.S., Friedl, K.E., Frykman, P.N., Hancock, J.W., Montain, S.J., Pryor, J.L., Santee, W.R., Potter, A.W., 9000. Modeling the Metabolic Costs of Heavy Military Backpacking. *Med. Sci. Sports Exerc.*
- Micklewright, D., St Clair Gibson, A., Gladwell, V., Al Salman, A., 2017. Development and Validity of the Rating-of-Fatigue Scale. *Sports Med.* 47, 2375-2393.
- Naidu, S.A., Fanchini, M., Cox, A., Smeaton, J., Hopkins, W.G., Serpiello, F.R., 2019. Validity of Session Rating of Perceived Exertion Assessed via the CR100 Scale to Track Internal Load in Elite Youth Football Players. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 14, 403-406.
- Orr, R., 2010. The History of the Soldier's Load. *Australian Army Journal* 7, 67-88.
- Osborne, A., Kelly, A., Nakaza, E., 2016. Physical demands analysis of typical infantry tasks and missions. Contract Report DRDC-RDDC-2021-C036.
- Park, H., Branson, D., Petrova, A., Peksoz, S., Jacobson, B., Warren, A., Goad, C., Kamenidis, P., 2013. Impact of ballistic body armour and load carriage on walking patterns and perceived comfort. *Ergonomics* 56, 1167-1179.
- Périard, J.D., Cramer, M.N., Chapman, P.G., Caillaud, C., Thompson, M.W., 2011. Cardiovascular strain impairs prolonged self-paced exercise in the heat. *Exp. Physiol.* 96, 134-144.
- Ramanathan, N., 1964. A new weighting system for mean surface temperature of the human body. *J. Appl. Physiol.* 19, 531-533.
- Sawka, M.N., Pandolf, K.B., 2001. Physical exercise in hot climates: physiology, performance, and biomedical issues. *Medical aspects of harsh environments* 1, 87-133.
- Science and Technology Organization, N.A.T.O., 2021. Reducing the Burden on the Dismounted Soldier, Final Report of RTG HFM-238.
- Svebak, S., Murgatroyd, S., 1985. Metamotivational dominance: a multimethod validation of reversal theory constructs. *J. Pers. Soc. Psychol.* 48, 107-116.
- Taylor, N.A., Burdon, C.A., van den Heuvel, A.M., Fogarty, A.L., Notley, S.R., Hunt, A.P., Billing, D.C., Drain, J.R., Silk, A.J., Patterson, M.J., Peoples, G.E., 2016. Balancing ballistic protection against physiological strain: evidence from laboratory and field trials. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* 41, 117-124.
- Taylor, N.A., Patterson, M.J., 2014. Military clothing and protective material: protection at the limits of physiological regulation, *The Mechanobiology and Mechanophysiology of Military-Related Injuries*. Springer, pp. 303-332.

## Chapitre 4 – Discussion

Les armures de protection sont indispensables pour protéger les soldats lors des missions, mais elles peuvent aussi causer des problèmes. En effet, ces armures peuvent augmenter la dépense énergétique nécessaire à l'effort physique, ce qui provoque une production accrue de chaleur métabolique. En même temps, elles peuvent empêcher la dissipation de cette chaleur par évaporation, ce qui peut exposer les soldats à un risque plus élevé de souffrir de problèmes de santé liés à la chaleur. En somme, les avantages et les inconvénients des armures doivent être soigneusement évalués afin d'optimiser leur efficacité et leur sécurité pour les soldats. Cette étude a analysé les effets de la variation du niveau de protection des armures modulaires sur les réponses physiologiques et perceptuelles lors de la marche en environnement chaud et sec. Les résultats montrent que la réduction de la couverture de l'armure de protection n'a pas entraîné de réduction significative des réponses thermorégulatrices, cardiovasculaires et perceptuelles lors de l'expérimentation. Autrement dit, réduire la couverture de l'armure ne semble pas être une solution pour améliorer les réponses physiologiques et perceptuelles lors de la pratique d'une tâche physique en environnement chaud.

Les forces armées ont tenté de réduire le fardeau qu'impose le port d'armure de protection en offrant des armures modulaires. Ces armures permettent de réduire la surface de couverture, mais réduisent également la charge totale. Puisque d'autres études (Caldwell et al., 2011; Taylor et al., 2016; van den Heuvel et al., 2011) ont déjà montré qu'une réduction de la charge de l'armure permet de réduire les réponses de thermorégulation et cardiovasculaire, cette étude s'est concentrée sur l'effet d'une réduction de la surface de couverture tout en maintenant la charge sensiblement la même entre les différentes configurations. Contrairement à notre hypothèse, une diminution de la surface de couverture de la veste de protection n'a pas affecté la température interne ni les autres réponses de

thermorégulation. Une observation importante est que le taux de transpiration n'était pas différent entre les différentes configurations évaluées. Puisque la production de chaleur métabolique n'était pas différente entre les configurations, nous pouvons déduire que de réduire la surface de couverture de la veste n'a pas permis une évaporation plus importante de la sueur produite. Ce résultat peut s'expliquer par le fait que la réduction de la surface de couverture (de 0,65 m<sup>2</sup> à 0,17 m<sup>2</sup>, soit une diminution de 30% à 11% de la surface corporelle) n'était pas suffisamment importante pour améliorer significativement les pertes de chaleur par évaporation et/ou que le type de matériaux qui composent les vêtements militaires portés sous la veste qui seraient relativement imperméables (Taylor & Patterson, 2014).

Dans l'optique de trouver une solution plus efficace à la réduction des réponses physiologiques et perceptuelles lors d'une tâche physique en environnement chaud, il serait intéressant de se pencher sur la possibilité d'utiliser des matériaux alternatifs qui pourraient offrir plus de confort, permettre une meilleure évaporation de la sueur tout en étant plus léger. Un matériel qui serait intéressant d'étudier serait l'utilisation d'un tissu en mailles sur la surface de contact de la veste. Ce tissu, ayant des mailles, pourrait permettre une meilleure ventilation tout en réduisant l'accumulation de la sueur dans la veste. L'augmentation de la circulation de l'air pourrait permettre de réduire l'augmentation de la température corporelle interne en augmentant l'évaporation de la sueur, ce qui permettrait un meilleur confort thermique (Ryan et al., 2014; Taylor, 2015). D'autre part, cette étude se limite au port de la veste et de l'uniforme militaire, mais il est connu qu'une augmentation d'une charge aux extrémités augmente le coût métabolique (Legg & Mahanty, 1986; Soule & Goldman, 1969). Non seulement le casque, mais le poids des bottes de combat et leur confort pourraient avoir un impact positif sur les réponses physiologiques. Une autre possibilité intéressante pourrait être d'intégrer un gel au niveau

des épaules, afin d'augmenter le confort de la veste, surtout dans le cas où la réduction de la charge n'est pas possible. Une diminution de la contrainte perceptuelle pourrait permettre d'augmenter le confort des soldats (Attwells et al., 2006; Knapik et al., 1996; Park et al., 2013). Toujours dans l'optique d'améliorer l'équipement, un meilleur confort pourrait également permettre de retarder la fatigue et la douleur liée au port de l'équipement procurant ainsi un avantage aux militaires puisque l'inconfort thermique et l'effort perçu réduisent les performances physiques et/ou cognitives (Flouris & Schlader, 2015). Il devrait donc y avoir une étude avant chaque déploiement afin d'adapter au maximum l'équipement porté par les militaires dépendamment de l'environnement dans lequel le combat prend place.

Une autre option qui pourrait permettre d'alléger le fardeau qu'impose le port de l'équipement de protection chez les militaires serait l'utilisation d'exosquelettes (Diamond-Ouellette et al., 2022). Il s'agit d'un dispositif portable utilisant des leviers mécaniques pour transférer la charge portée par les soldats directement au sol. L'exosquelette est capable de transférer de 50% à 80% de la charge vers le sol, autant en condition statique que dynamique. Cela permet d'alléger la charge que transporte le soldat tout en demeurant mobile. Avec l'utilisation d'un exosquelette, le nombre de blessures musculosquelettiques ainsi que la fatigue pourraient être diminués. En effet, cet équipement permet de diminuer jusqu'à 25% la dépense énergétique des soldats (Diamond-Ouellette et al., 2022).

Une étude réalisée par Tingelstad et al. (2020) a analysé l'effet du port de l'équipement de protection lors d'une tâche physique en environnement chaud chez des réservistes dans les Forces armées canadiennes (groupe expérimenté) et chez un groupe sans expérience. Les participants devaient marcher sur un tapis roulant à une vitesse de 5,17km/h avec une pente de 1% pendant 60

minutes tout en portant un équipement de protection militaire de  $35,1 \pm 0,5$  kg. Les résultats démontrent que les réservistes avaient plus de facilité à compléter les visites comparativement au groupe sans expérience, sans qu'il ait de différence dans les réponses physiologiques. Seulement la moitié des participants sans expérience a pu compléter les visites, l'autre moitié a abandonné au cours de la session en raison de l'épuisement et de l'inconfort causés par l'équipement. Le fait d'être entraîné à une tâche spécifique permet d'avoir une meilleure performance. Dans cette présente étude, une faible proportion de participants est parvenue à terminer les 60 minutes de marche sur le tapis roulant. Les participants qui ont été recrutés pour cette étude étaient principalement des étudiants universitaires, ayant tout de même un bon niveau de condition physique ( $48,7 \pm 3,4$  mL/kg/min). En effet, le recrutement de militaires pour la réalisation de cette étude aurait pu permettre un meilleur taux de complétion de l'expérimentation, même s'il semble peu probable qu'une réduction de la surface de protection aurait réduit la contrainte physiologique au sein de cette population.

## Limitations

Il est important de souligner que les conclusions de cette étude ne peuvent être généralisées qu'aux configurations d'armures modulaires étudiées ainsi qu'aux conditions environnementales spécifiques à l'expérimentation. Il est possible que d'autres configurations d'armures puissent produire des effets différents, si elles parviennent à réduire la surface de couverture de la veste de manière plus importante ou si elles sont plus légères, ce qui réduirait le coût métabolique de l'effort physique (Taylor et al., 2016). De plus, les conclusions de cette étude concernent spécifiquement des niveaux de production de chaleur métabolique élevée, un environnement chaud et sec et une durée d'exercice courte. Il est possible que les réponses physiologiques et perceptuelles puissent être différentes lors d'exercices de différentes intensités et durées et/ou dans d'autres environnements (Hunt et al., 2022).

## Conclusion

Les résultats de cette étude montrent que même en réduisant la surface de couverture de la veste de protection de 60%, les réponses thermiques, cardiovasculaires et perceptuelles n'ont pas été affectées pendant une marche sur tapis roulant dans un environnement chaud et sec. Ces résultats suggèrent que seule une réduction de la surface de couverture de l'armure ne suffit pas à offrir un avantage physiologique ou perceptuel à la capacité opérationnelle des soldats dans des environnements chauds et secs.

## Bibliographie

- Alele, F. O., Malau-Aduli, B. S., Malau-Aduli, A. E. O., & M, J. C. (2020). Epidemiology of Exertional Heat Illness in the Military: A Systematic Review of Observational Studies. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(19). <https://doi.org/10.3390/ijerph17197037>
- Attwells, R. L., Birrell, S. A., Hooper, R. H., & Mansfield, N. J. (2006). Influence of carrying heavy loads on soldiers' posture, movements and gait. *Ergonomics*, 49(14), 1527-1537. <https://doi.org/10.1080/00140130600757237>
- Becker, J. A., & Stewart, L. K. (2011). Heat-related illness. *American Family Physician*, 83(11), 1325-1330.
- Bhendura, M., Muralidhar, K., & Khandekar, S. (2020). Introduction to Evaporative Heat Transfer. In *Drop Dynamics and Dropwise Condensation on Textured Surfaces* (pp. 131-146). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-48461-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-48461-3_4)
- Bossi, L., Tack, D., Karakolis, T., Keefe, A., & Jones, M. (2020). Rationalizing the approach to mitigate soldier physical burden: are Ironman or Captain America our Magic Bullet. In: *Transhumanising war: performance implications for policy, society, and the ....*
- Bouchama, A., Abuyassin, B., Lehe, C., Laitano, O., Jay, O., O'Connor, F. G., & Leon, L. R. (2022). Classic and exertional heatstroke. *Nat Rev Dis Primers*, 8(1), 8. <https://doi.org/10.1038/s41572-021-00334-6>
- Bouchama, A., & Knochel, J. P. (2002). Heat stroke. *New England Journal of Medicine*, 346(25), 1978-1988. <https://doi.org/10.1056/NEJMra011089>
- Caldwell, J. N., Engelen, L., van der Henst, C., Patterson, M. J., & Taylor, N. A. (2011). The interaction of body armor, low-intensity exercise, and hot-humid conditions on physiological strain and cognitive function. *Military Medicine*, 176(5), 488-493. <https://doi.org/10.7205/milmed-d-10-00010>
- Carter, R., 3rd, Chevront, S. N., Williams, J. O., Kolka, M. A., Stephenson, L. A., Sawka, M. N., & Amoroso, P. J. (2005). Epidemiology of hospitalizations and deaths from heat illness in soldiers. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 37(8), 1338-1344. <https://doi.org/10.1249/01.mss.0000174895.19639.ed>
- Castellani, J. W., & Young, A. J. (2016). Human physiological responses to cold exposure: Acute responses and acclimatization to prolonged exposure. *Autonomic Neuroscience*, 196, 63-74. <https://doi.org/10.1016/j.autneu.2016.02.009>
- Cramer, M. N., Gagnon, D., Laitano, O., & Crandall, C. G. (2022). Human temperature regulation under heat stress in health, disease, and injury. *Physiological Reviews*, 102(4), 1907-1989. <https://doi.org/10.1152/physrev.00047.2021>

- Dessureault, P. C., & Doucet, M. (2003). *Évaluation des indices de contrainte thermique en mines profondes: rapport*. Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail du ...
- Diamond-Ouellette, G., Telonio, A., Karakolis, T., Leblond, J., Bouyer, L. J., & Best, K. L. (2022). Exploring the Change in Metabolic Cost of Walking before and after Familiarization with a Passive Load-Bearing Exoskeleton: A Case Series. *IIE Trans Occup Ergon Hum Factors*, 10(3), 161-172. <https://doi.org/10.1080/24725838.2022.2124325>
- Dickinson, J. G. (1994). Heat illness in the services. *Journal of the Royal Army Medical Corps*, 140(1), 7-12. <https://doi.org/10.1136/jramc-140-01-02>
- Drain, J., Orr, R., Attwells, R., & Billing, D. (2012). *Load Carriage Capacity of the Dismounted Combatant-A Commanders' Guide*.
- Ebi, K. L., Capon, A., Berry, P., Broderick, C., de Dear, R., Havenith, G., Honda, Y., Kovats, R. S., Ma, W., Malik, A., Morris, N. B., Nybo, L., Seneviratne, S. I., Vanos, J., & Jay, O. (2021). Hot weather and heat extremes: health risks. *Lancet*, 398(10301), 698-708. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(21\)01208-3](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(21)01208-3)
- Flouris, A. D., & Schlader, Z. J. (2015). Human behavioral thermoregulation during exercise in the heat. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 25 Suppl 1, 52-64. <https://doi.org/10.1111/sms.12349>
- Gagnon, D., Bartlett, A. A., Deshayes, T. A., Vanzella, L. M., Marzolini, S., & Oh, P. (2023). Exercise for cardiac rehabilitation in a warming climate. *Canadian Journal of Cardiology*. <https://doi.org/10.1016/j.cjca.2023.02.011>
- Glazer, J. L. (2005). Management of heatstroke and heat exhaustion. *American Family Physician*, 71(11), 2133-2140.
- González-Alonso, J., Quistorff, B., Krustrup, P., Bangsbo, J., & Saltin, B. (2000). Heat production in human skeletal muscle at the onset of intense dynamic exercise. *Journal of Physiology*, 524 Pt 2(Pt 2), 603-615. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7793.2000.00603.x>
- Huang, C., Ma, J., & Li, A. (2020). Chapter 6 - Target levels. In H. D. Goodfellow & R. Kosonen (Eds.), *Industrial Ventilation Design Guidebook (Second Edition)* (pp. 227-243). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816780-9.00006-X>
- Hunt, A. P., Potter, A. W., Linnane, D. M., Xu, X., Patterson, M. J., & Stewart, I. B. (2022). Heat Stress Management in the Military: Wet-Bulb Globe Temperature Offsets for Modern Body Armor Systems. *Human Factors*, 64(8), 1306-1316. <https://doi.org/10.1177/00187208211005220>
- Knapik, J., Harman, E., & Reynolds, K. (1996). Load carriage using packs: a review of physiological, biomechanical and medical aspects. *Applied Ergonomics*, 27(3), 207-216. [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(96\)00013-0](https://doi.org/10.1016/0003-6870(96)00013-0)

- Kobus, D. A., Brown, C. M., Wu, L., Robusto, K., & Bartlett, J. (2010). *Cognitive performance and physiological changes under heavy load carriage*.
- Larsen, B., Netto, K., & Aisbett, B. (2011). The effect of body armor on performance, thermal stress, and exertion: a critical review. *Military Medicine*, 176(11), 1265-1273. <https://doi.org/10.7205/milmed-d-10-00470>
- Legg, S. J., & Mahanty, A. (1986). Energy cost of backpacking in heavy boots. *Ergonomics*, 29(3), 433-438. <https://doi.org/10.1080/00140138608968276>
- Looney, D. P., Lavoie, E. M., Vangala, S. V., Holden, L. D., Figueiredo, P. S., Friedl, K. E., Frykman, P. N., Hancock, J. W., Montain, S. J., Pryor, J. L., Santee, W. R., & Potter, A. W. (2022). Modeling the Metabolic Costs of Heavy Military Backpacking. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 54(4), 646-654. <https://doi.org/10.1249/mss.0000000000002833>
- Martin, K., McLeod, E., Périard, J., Rattray, B., Keegan, R., & Pyne, D. B. (2019). The Impact of Environmental Stress on Cognitive Performance: A Systematic Review. *Human Factors*, 61(8), 1205-1246. <https://doi.org/10.1177/0018720819839817>
- McLellan, T. M., Daanen, H. A., & Cheung, S. S. (2013). Encapsulated environment. *Compr Physiol*, 3(3), 1363-1391. <https://doi.org/10.1002/cphy.c130002>
- McLellan, T. M., Pope, J. I., Cain, J. B., & Cheung, S. S. (1996). Effects of metabolic rate and ambient vapour pressure on heat strain in protective clothing. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 74(6), 518-527. <https://doi.org/10.1007/bf02376767>
- Orr, R. (2010). The History of the Soldier's Load. *Australian Army Journal*, vii, 67-88.
- Orr, R., Drain, J., Billing, D., & Rudzki, S. (2010). *Human Dimensions of Heavy Load Carriage*.
- Park, H., Branson, D., Petrova, A., Peksoz, S., Jacobson, B., Warren, A., Goad, C., & Kamenidis, P. (2013). Impact of ballistic body armour and load carriage on walking patterns and perceived comfort. *Ergonomics*, 56(7), 1167-1179. <https://doi.org/10.1080/00140139.2013.791377>
- Parsons, K. (2003). *Human Thermal Environments; The effects of hot, moderate and cold environments on human health, comfort and performance*. Taylor & Francis.
- Périard, J. D., DeGroot, D., & Jay, O. (2022). Exertional heat stroke in sport and the military: epidemiology and mitigation. *Experimental Physiology*, 107(10), 1111-1121. <https://doi.org/10.1113/ep090686>
- Ricciardi, R., Deuster, P. A., & Talbot, L. A. (2008). Metabolic demands of body armor on physical performance in simulated conditions. *Military Medicine*, 173(9), 817-824. <https://doi.org/10.7205/milmed.173.9.817>

- Ryan, G. A., Bishop, S. H., Herron, R. L., Katica, C. P., Elbon, B. L., Bosak, A. M., & Bishop, P. (2014). Ambient air cooling for concealed soft body armor in a hot environment. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 11(2), 93-100. <https://doi.org/10.1080/15459624.2013.843782>
- Schmit, C., Hausswirth, C., Le Meur, Y., & Duffield, R. (2017). Cognitive Functioning and Heat Strain: Performance Responses and Protective Strategies. *Sports Medicine*, 47(7), 1289-1302. <https://doi.org/10.1007/s40279-016-0657-z>
- Singh, G., Bennett, K., Taylor, L., & Stevens, C. (2023). Core body temperature responses during competitive sporting events: a narrative review [journal article]. *Biology of Sport*. <https://doi.org/10.5114/biolsport.2023.124842>
- Sokolova, I. (2019). Temperature Regulation☆. In B. Fath (Ed.), *Encyclopedia of Ecology (Second Edition)* (pp. 633-639). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11129-7>
- Soule, R. G., & Goldman, R. F. (1969). Energy cost of loads carried on the head, hands, or feet. *Journal of Applied Physiology*, 27(5), 687-690. <https://doi.org/10.1152/jappl.1969.27.5.687>
- Tack, D. W. (2018). *User needs analysis for burden mitigation support to army stakeholder organizations*.
- Taylor, N. A. (2015). Overwhelming Physiological Regulation Through Personal Protection. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 29 Suppl 11, S111-118. <https://doi.org/10.1519/jsc.0000000000001030>
- Taylor, N. A., Burdon, C. A., van den Heuvel, A. M., Fogarty, A. L., Notley, S. R., Hunt, A. P., Billing, D. C., Drain, J. R., Silk, A. J., Patterson, M. J., & Peoples, G. E. (2016). Balancing ballistic protection against physiological strain: evidence from laboratory and field trials. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism. Physiologie Appliquée, Nutrition et Métabolisme*, 41(2), 117-124. <https://doi.org/10.1139/apnm-2015-0386>
- Taylor, N. A., & Patterson, M. J. (2014). Military clothing and protective material: protection at the limits of physiological regulation. In *The Mechanobiology and Mechanophysiology of Military-Related Injuries* (pp. 303-332). Springer.
- Teitlebaum, A., & Goldman, R. F. (1972). Increased energy cost with multiple clothing layers. *Journal of Applied Physiology*, 32(6), 743-744. <https://doi.org/10.1152/jappl.1972.32.6.743>
- Tingelstad, H., Reilly, T., Kehoe, B., Verdon, E., Semeniuk, K., & Haman, F. (2020). Loaded March and FORCE Combat™ Performance: Effects of Heat Exposure and Previous Experience. *Journal of Military & Veterans' Health*, 28(2), 6-17. <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=ccm&AN=144431374&lang=fr&site=ehost-live>

van den Heuvel, A. M., van Dijk, W., Notley, S. R., Patterson, M. J., Peoples, G. E., & Taylor, N. A. (2011). Physiological strain associated with wearing body armour of increasing ballistic protection. Proceedings of the Fourteenth International Conference on Environmental Ergonomics,

W.Larry Kenney, J. H. W., David L. Costill. (2013). *Physiology of sports and exercise* (P. D. Arlette Delamarche, Carole Groussard, Hassane Zouhal, Trans.; D. Boeck, Ed. 5e édition ed.). Human Kinetics.

## Annexe

### **Formulaire de l'approbation à l'éthique – Projet #2022-2989 - MSA-CEC**



INSTITUT DE  
CARDIOLOGIE  
DE MONTRÉAL

AFFILIÉ À  
Université   
de Montréal

Le 28 juillet 2021

Docteur Daniel Gagnon  
Centre ÉPIC  
Institut de Cardiologie de Montréal

**Projet #2022-2989 - MSA-CEC**

**Évaluation d'armures modulaires lors d'une tâche physique effectuée en environnement chaud.**

---

Cher Docteur Gagnon,

Nous vous adressons la décision du Comité d'éthique lors de l'analyse de vos documents soumis à la réunion du 22 juillet 2021 concernant votre projet.

- Formulaire de réponses aux conditions (F20-20383).
  - Formulaire d'information et de consentement
    - [2022-2989-FIC-F-DGagnon-\(MSA-CEC\)-vers révisée par équipe-25juin2021.docx](#) [ date : 2021-06-25 version : 02 ]
  - Protocole de recherche
    - [2022-2989\\_MSA-CEC\\_Protocole ICM\\_v2.docx](#) [ date : 2021-06-25 version : 02 ]
  - Rapport d'évaluation (CIR)
    - [2022-2989-DGagnon-Approbation scientifique-5juillet2021.pdf](#) [ date : 2021-07-05 version : Approbation scientifique ]
  - Recrutement
    - [2022-2989-Affiche-DGagnon-\(MSA-CEC\)-vers révisée par l'équipe-25juin2021.docx](#) [ date : 2021-06-25 version : 02 ]

**Décision du Comité : Approuvé**

Le début du projet de recherche est autorisé.

La version française no. 1 datée du 22 juillet 2021 du formulaire d'information et de consentement est approuvée. La version française de l'affiche datée du 22 juillet 2021 est approuvée.

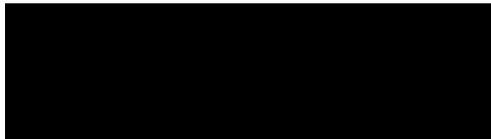
La présente constitue l'approbation éthique du projet, valide pour un an, à compter du 22 juillet 2021 jusqu'au 22 juillet 2022.

Le formulaire de demande de renouvellement annuel du projet devra être acheminé au Comité d'éthique un mois avant la date d'échéance afin d'éviter toute suspension ou révocation du projet de recherche.

Les versions électroniques du formulaire d'information et de consentement ainsi que l'affiche ci-haut mentionnés sont disponibles dans Nagano sous l'onglet *Mes projets/Fichiers/FIC* et [...] *Recrutement* de votre projet de recherche.

Le Comité d'éthique de la recherche et du développement des nouvelles technologies de l'Institut de Cardiologie de Montréal (numéro FWA00003235) est désigné par le gouvernement du Québec (MSSS) et adhère aux directives publiées dans *l'ÉPTC 2 - Énoncé de politique des trois conseils : Éthique de la recherche avec des êtres humains* (2014), conformément au *Plan d'action ministériel en éthique de la recherche et en intégrité scientifique* (MSSS 1998). Le Comité adhère aux exigences édictées pour les Comités d'éthique de la recherche selon la Partie C, Titre 5 du *Règlement sur les aliments et drogues* (C.R.C. ch. 870) et agit en conformité avec les standards du *United States Code of Federal Regulations* encadrant la recherche impliquant des sujets humains. Le Comité fonctionne de manière compatible avec les standards internationaux en appliquant notamment la ligne directrice de l'ICH adoptée par Santé Canada : *Les bonnes pratiques cliniques : directives consolidées*.

Veuillez agréer, Cher Docteur Gagnon, l'expression de mes sentiments les meilleurs.



Philippe Bessette, Secrétariat du CÉRDNT  
Pour Dr Christian Ayoub  
Anesthésiologiste, MD, B.Pharm, FRCPC  
Président du Comité d'éthique de la recherche et  
du développement des nouvelles technologies