

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ACTIVITÉ PHYSIQUE (3407)

PAR
PHILIPPE LACROIX

ÉLABORATION D'UN PROTOCOLE D'ÉVALUATION
DE LA PUISSANCE CRITIQUE À LA MARCHÉ INCLINÉE AVEC CHARGE

Mai 2023

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire, de cette thèse ou de cet essai a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire, de sa thèse ou de son essai.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire, cette thèse ou cet essai. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire, de cette thèse et de son essai requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ACTIVITÉ PHYSIQUE (3407)

Direction de recherche

Claude Lajoie, Ph.D.

Directeur de recherche

Annie Gendron, Ph.D.

Co-directrice de recherche

Jury d'évaluation

Claude Lajoie, Ph.D.

Directeur de recherche

Annie Gendron, Ph.D.

Co-directrice de recherche

Philippe Gendron, Ph.D.

Évaluateur

Martin Lavallière, Ph.D.

Évaluateur

RÉSUMÉ

Pour de nombreuses professions et occupations des métiers d'urgence, la marche est le moyen de locomotion privilégié. Or, les membres de certains métiers comme les pompiers, les policiers spécialisés, et les militaires peuvent difficilement courir pendant leurs opérations en raison du poids de l'équipement qu'ils portent, ou n'y sont pas autorisés dans des circonstances normales en raison de la réglementation qui encadre leur profession. Parallèlement, beaucoup de ces métiers requièrent une évaluation de la condition physique afin de s'assurer que les employés ont les capacités physiques minimales pour satisfaire les exigences du travail. Un protocole de test utilisant la marche comme moyen de locomotion serait adapté à cette catégorie d'emploi et ce, surtout si on considère que ces populations doivent supporter le poids des équipements de protection corporelle. Bien qu'il existe plusieurs tests de marche établis, la majorité sont conçus pour des sujets peu entraînés ou pathologiques. De plus, ils permettent généralement l'estimation de la consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_{2max}$), mais n'évaluent pas l'endurance aérobie. Or, pour une population plus athlétique, l'évaluation de la puissance critique (PC) et de la réserve énergétique supra-puissance critique (W') serait appropriée. Toutefois, ce concept n'a jamais été étudié à la marche.

Cette étude avait donc pour objectif d'appliquer le concept de PC- W' à la marche inclinée en portant une charge chez des participants actifs et en santé.

Dix-huit participants (âge $32,1 \pm 11,8$ ans; poids corporel $67,6 \pm 14,0$ kg) ont complété un test incrémentiel (TI) et trois tests à pente constante (TPC) sur tapis roulant

incliné en portant une charge correspondant à 25% de leur poids corporel. Le TI a permis aux participants d'effectuer un effort maximal tel que démontré par l'atteinte des critères usuels de consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_{2max}$). De plus, les TPC ont permis d'atteindre le même niveau d'effort que le TI, tel que démontré par la similarité des valeurs de consommation d'oxygène ($p = 0,98$), fréquence cardiaque maximale ($p = 0,24$), d'oxygénation musculaire ($p = 0,456$) et de désoxygénation musculaire ($p = 0,975$). La PC était fortement corrélée au $\dot{V}O_{2max}$ absolu ($r = 0,920$, $p < 0,001$), tout comme la puissance critique relative (PCr) l'était au $\dot{V}O_{2max}$ relatif ($r = 0,805$, $p = 0,002$). L'analyse statistique a démontré qu'il n'y avait pas de différence entre la PC calculée à partir des trois TPC et celle calculée à partir de n'importe quelle combinaison de deux TPC ($p = 0,16$). De plus, le W' peut être calculé sans différence significative à partir du TPC court et TPC long ($p = 1,000$).

Les résultats de cette étude démontrent qu'il est possible d'appliquer les concepts de PC et de W' à la marche inclinée avec charge. Ceci pourrait être utile pour évaluer des pompiers, des policiers tactiques, des militaires, des randonneurs alpins, des skieurs de randonnée alpine, et d'autres populations chez qui les évaluations à la course à pied ou sur ergocycle sont inappropriées.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	i
TABLE DES MATIÈRES	iii
LISTE DES TABLEAUX.....	vi
LISTE DES FIGURES.....	vii
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	viii
REMERCIEMENTS	x
INTRODUCTION	1
PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE.....	3
Limites des tests à la marche.....	4
Augmentation de la pente et/ou de la masse	5
CADRE THÉORIQUE	8
Consommation maximale d'oxygène chez différentes populations.....	8
Puissance critique et réserve énergétique supra-puissance critique.....	10
Évaluation de populations par la marche	15
Mécanique de la marche - vitesse, pente et charge	18
Spectroscopie dans le proche-infrarouge (SPIR)	21
OBJECTIFS	23

ARTICLE	24
Critical power applied to inclined loaded walking	25
Abstract	25
Practitioner Summary.....	25
Keywords	25
Funding details	25
Disclosure statement	25
Introduction	26
Materials and methods	27
Near-infrared spectroscopy	27
Multiple jumps test.....	27
Incremental and constant-incline tests	28
Statistical analysis	29
Results	30
Incremental tests.....	30
Constant incline tests	32
Critical power and W'	33
Two vs three tests.....	35
Discussion	35

Conclusion	38
Acknowledgements	38
Declaration of interest	39
References	39
DISCUSSION GÉNÉRALE	42
CONCLUSION	48
Limites, perspective et retombées	50
RÉFÉRENCES	53
ANNEXE A	60
ANNEXE B	63
ANNEXE C	67

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Classification de la $\dot{V}O_{2\max}$ par sexe et groupe d'âge.	10
Table 1. Volunteers Biometrics	30
Table 2. Incremental Test (IT) Results	31
Table 3. Incremental (IT) and Constant-Incline Test (CIT) Results	33
Table 4. rMAP, rCP, Ratio of rCP and rMAP, and W'	34

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Représentation graphique des domaine de puissance	122
Figure 1. Relative Maximal Aerobic Power (rMAP) vs Measured $\dot{V}O_{2max}$	31
Figure 2. ΔO_2Hb and ΔHHb versus Relative Maximal Aerobic Power	32
Figure 3. a) CP vs absolute $\dot{V}O_{2max}$ and b) rCP vs relative $\dot{V}O_{2max}$	34
Figure 4. a) CP and b) W' as Calculated from All Combinations of Tests.....	35

LISTE DES ABRÉVIATIONS

Abréviation	Signification	Unité de mesure
6MWT	Six-minute walk test	
EEML	État d'équilibre maximal de lactate	
EPJ	Exigence professionnelle justifiée	
FC _{max}	Fréquence cardiaque maximale	
HHb	Désoxyhémoglobine	
O ₂ Hb	Oxyhémoglobine	
PAM	Puissance aérobie maximale	W
PAMr	Puissance aérobie maximale relative	W·kg ⁻¹
PC	Puissance critique	W
PCr	Puissance critique relative	W·kg ⁻¹
QR	Quotient respiratoire	
SCPE	Société canadienne de physiologie de l'exercice	
SPIR	Spectroscopie dans le proche infra-rouge	
SmO ₂	Saturation musculaire en oxygène	%
TI	Test incrémentiel	
TPC	Test à pente constante	
TPCC	Test à pente constante court	

TPCI	Test à pente constante intermédiaire	
TPCL	Test à pente constante long	
TSI	Tissue saturation index	%
TSM30	Test de sauts multiples de 30 secondes	
$\dot{V}O_2$	Consommation d'oxygène	$\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ $\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$
$\dot{V}O_{2\text{max}}$	Consommation maximale d'oxygène	$\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ $\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$
$\dot{V}O_{2\text{pic}}$	Plus haute consommation d'oxygène atteinte	$\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ $\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$
W'	Réserve énergétique supra-puissance critique	J

REMERCIEMENTS

Vous m'avez soutenu, accompagné et encouragé lors de ce périple académique. Je n'aurais pu espérer un meilleur appui que celui que j'ai reçu. Je vous remercie Alain et Ginette.

Pour ta patience, ton support, ton amour, merci Natacha.

Claude, ton ouverture d'esprit, ta créativité et ton humanisme ont été essentiels pour surmonter les nombreux obstacles. Merci.

Trop nombreux sont ceux et celles que je devrais remercier, des professeurs, des collègues, des amis. Merci à tous.

INTRODUCTION

La marche est le moyen de locomotion le plus commun dans le monde. C'est un moyen économique, simple, écologique, et accessible en tout temps. De nombreux anthropologues et autres scientifiques de domaines variés en font un élément primordial de l'humanité. Par exemple, Schultz (1950) soutient l'idée que l'acquisition de la posture érigée, et par conséquent, la marche, a été la première étape majeure de l'évolution de l'Homme, précédant même l'agrandissement de la boîte crânienne. Même Freud (1930), père de la psychanalyse, a écrit que « la posture érigée représenterait le début de l'important procédé d'évolution culturelle. »

L'appareil locomoteur nécessaire à la marche est donc d'une importance capitale pour les humains. Par conséquent, la marche est un mouvement très étudié : sa biomécanique (Mann & Hagy, 1980), les facteurs qui augmentent ou diminuent son efficacité (Mian et al., 2006), l'impact des conditions environnementales (Horiuchi et al., 2018; Weller et al., 1998), et les effets sur la santé (Lee & Buchner, 2008).

Toutefois, quelques domaines pourraient bénéficier de recherches additionnelles. Par exemple, pour de nombreux corps de métiers d'urgence, le poids des équipements de protection rend la course très exigeante physiquement, voire impossible. Par conséquent, la marche est favorisée lors d'interventions car elle permet une approche plus sécuritaire des lieux d'intervention et permet de meilleures interventions lors de certaines situations critiques. Considérant que les évaluations de la condition physique dans un contexte

professionnel ou sportif ont avantage à être aussi représentatives que possible des véritables tâches, il serait opportun de pouvoir mesurer la performance à la marche de ces populations. Or, la marche simple ne permet pas l'évaluation du $\dot{V}O_{2max}$ ni l'endurance aérobie d'individus dont la condition physique se situe dans la moyenne de la population ou au-dessus de celle-ci. Il existe également des catégories d'occupations où les candidats potentiels et les employés doivent atteindre un seuil minimal de performance qui peut être au-delà des capacités physiques de la majorité des gens. Par conséquent, il convient de trouver des manières de rendre cet exercice plus exigeant.

PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE

La marche occasionne une demande métabolique relativement faible, mais bénéficie d'une très grande efficacité énergétique. En comparaison, le coût énergétique de la course par unité de distance est supérieur à celui de la marche (Cavagna & Kaneko, 1977), conclusion que Minetti et al. (2002) partagent. Ce dernier a mesuré que le coût énergétique de la course était de $3,40 \pm 0,24 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ chez des athlètes de courses d'ultra-endurance alors que celui de la marche est de $1,64 \pm 0,50 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, soit un peu moins que la moitié. C'est pourquoi il s'agit du mode de locomotion naturel privilégié pour se déplacer. Une consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_{2\max}$) faible est suffisante pour marcher sur une surface non-inclinée, et ce, même à la vitesse de marche la plus élevée qu'un individu peut atteindre avant de faire la transition vers la course. Dans l'étude de Burr et al. (2011), des individus sélectionnés parmi la population générale ont effectué le test de marche de six minutes (6MWT) (Enright, 2003) où les participants ont parcouru la plus grande distance possible en six minutes. Ils ont atteint en moyenne une consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$) de $28,7 \pm 5,7 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$. Bien que cette valeur contraste grandement avec le $\dot{V}O_2$ prédit par l'équation de Pandolf (Pandolf et al., 1977), soit environ $19,5 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$, il n'en demeure pas moins qu'elle a permis d'atteindre seulement 74 % du $\dot{V}O_{2\max}$ de ces participants. Chez une population plus active, le pourcentage du $\dot{V}O_{2\max}$ potentiellement atteignable à la marche serait encore plus faible. Par exemple, le $\dot{V}O_{2\max}$ a été estimé à $44,8 \pm 5,3 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ à la course (Thomas et al., 2018) chez des policiers faisant partie d'un groupe tactique d'intervention, et à $47,8 \pm 5,1 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ chez un

sous-groupe de pompiers en très bonne condition physique (Gendron et al., 2015). Il est donc évident que la marche sur une surface plane et sans charge ajoutée ne permet pas d'évaluer le $\dot{V}O_{2\max}$ d'individus en bonne condition physique.

Limites des tests à la marche

Il est impossible d'augmenter la demande métabolique de la marche au-delà d'une certaine limite uniquement en augmentant la vitesse, car à un certain point, il est naturel de faire la transition vers le pas de course. Selon Alexander (1984) et Cavagna (1969), cette transition servirait à diminuer la demande énergétique. Il est connu que la marche occasionne une plus grande demande énergétique que la course au-delà d'une certaine vitesse (Cavagna & Kaneko, 1977). Toutefois, Hreljac (1993) a démontré que la transition se fait à une vitesse sous-optimale du point de vue énergétique. Ses recherches l'ont mené à penser que la principale raison de la transition vers la course est qu'elle minimise la contrainte sur les muscles responsables de la dorsiflexion de la cheville (Hreljac, 1995). Chez ses participants, cette vitesse a été mesurée à $7,3 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ en moyenne sur un tapis roulant sans inclinaison, ce qui correspond à une consommation d'oxygène de $22,0 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ à la marche selon l'équation de Pandolf (Pandolf et al., 1977).

Pour tester des individus plus actifs, certains tests sont plus communs pour estimer le $\dot{V}O_{2\max}$ tels que le test de navette de Léger (Léger & Lambert, 1982), le test incrémentiel à la course sur tapis roulant et le test incrémentiel sur vélo stationnaire. Pour chacun de

ces tests, la puissance ou la vitesse du dernier palier complété est corrélée au $\dot{V}O_{2max}$. Pour plus de précision toutefois, l'analyse des gaz respiratoires par calorimétrie indirecte peut être faite simultanément afin de mesurer le $\dot{V}O_2$. Aucun de ces tests n'utilise toutefois la marche pour stimuler le système aérobie, ce qui diminue la transférabilité des résultats vers ce type d'effort.

Augmentation de la pente et/ou de la masse

Outre la vitesse discutée précédemment, il y a trois moyens additionnels pour rendre la marche à pied plus exigeantes sur le système aérobie. Le premier consiste à augmenter la pente. Le second requiert que le participant porte une charge additionnelle, généralement une veste ou un sac à dos lesté. Finalement, la troisième méthode est une combinaison des deux premières.

L'augmentation de la pente a été utilisée à plusieurs reprises (Ebbeling et al., 1991; Minetti et al., 2002). Ebbeling (1991) a d'ailleurs élaboré un test sous-maximal permettant d'estimer le $\dot{V}O_{2max}$. Lors de la marche sur plan incliné, la demande métabolique accrue provient de la nécessité de soulever la totalité de son poids à chaque pas et par conséquent, la contrainte musculaire est plus élevée. Si ce test permet de connaître les limites de personnes en moins bonne santé, son inconvénient principal est qu'il permet rarement de déterminer avec précision le $\dot{V}O_{2max}$ de participants ayant une très bonne condition physique. De plus, la biomécanique est légèrement altérée par la pente (Lange et al., 1996;

Leroux et al., 2002), ce qui peut occasionner une fatigue musculaire importante au niveau des muscles de la jambe, menant à un abandon prématuré du test, et donc à un $\dot{V}O_2$ sous-maximal.

Le second moyen pour augmenter la demande métabolique à la marche est d'ajouter de la masse à déplacer par le marcheur sous forme de sac à dos, de veste lestée, ou d'équipements de protection dans le cas d'évaluation de professionnels des métiers d'urgence (Knapik et al., 2012; Robinson et al., 2018). Ce mode de test est couramment utilisé, particulièrement chez les militaires, les groupes tactiques d'intervention de la police et les pompiers. Sa popularité dans ces milieux est due au fait que, lorsque la condition physique est un critère d'embauche, les employeurs doivent utiliser des tests qui respectent le cadre légal des exigences professionnelles justifiées (EPJ) (Gledhill et al., 2001; Jamnik et al., 2013). Par conséquent, il est pertinent que le mode d'évaluation soit aussi représentatif des tâches à effectuer que possible.

Les équipements portés par les policiers des groupes tactiques d'intervention et les pompiers pèsent généralement entre 15 kg et 25 kg, mais peuvent atteindre 46 kg dans certaines situations (Carlton et al., 2014; Knapik et al., 2012; Thomas et al., 2018). Toutefois, bien que la charge puisse augmenter considérablement la demande métabolique, il n'a pas été démontré qu'elle permet d'atteindre le $\dot{V}O_{2max}$ à la marche sur un parcours plat chez ces populations.

C'est pourquoi la combinaison d'un plan incliné et d'une charge est nécessaire pour atteindre le $\dot{V}O_{2max}$ d'individus entraînés. Ce mode d'évaluation a été étudié par le passé (Klimek & Klimek, 2007; Kravitz & McCormick, 2013; Swearingen et al., 2018; Walker et al., 2015). Les études de Klimek et Klimek (2007) et Walker (2015) ont d'ailleurs permis de mesurer des valeurs moyennes de $\dot{V}O_{2max}$ de $60,4 \pm 5,0$ et $56,0 \pm 1,2$ $ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$ chez des étudiants universitaires, soit bien au-delà de la majorité de la population, et surtout, au-delà des valeurs typiques de $\dot{V}O_{2max}$ de policiers (Thomas et al., 2018) ou même de pompiers dont la condition physique est supérieure à la moyenne (Gendron et al., 2015; Gendron et al., 2018).

Bien que le $\dot{V}O_{2max}$ soit une mesure physiologique très importante pour l'évaluation de la condition physique, il ne fournit aucune indication sur la capacité à fournir un effort de longue durée ni sur l'implication du système anaérobie. De plus, au niveau individuel, le $\dot{V}O_{2max}$ permet difficilement la prédiction de la performance pour des épreuves de différentes durées, particulièrement pour des épreuves de 2 à 5 minutes. Pour pallier cet inconvénient, la mesure de la puissance critique (PC) et de la réserve énergétique supra-puissance critique (W') apporte des bénéfices considérables (Poole et al., 2016). Or, aucune étude n'a été recensée où les notions de PC-W' à la marche sur tapis roulant avec charge ont été abordées.

CADRE THÉORIQUE

Consommation maximale d'oxygène chez différentes populations

Le $\dot{V}O_{2\max}$ est l'une des principales mesures physiologiques permettant l'appréciation de la santé, de la condition physique, et des risques de pathologies cardiovasculaires et métaboliques. Il correspond au volume d'oxygène utilisé par unité de temps pour métaboliser les glucides et les lipides afin de produire l'énergie nécessaire aux fonctions biologiques. La consommation d'oxygène peut être décrite par l'équation de Fick:

$$\dot{V}O_2 = Q * [C(a - v)]_{O_2} \quad (1)$$

où Q représente le débit sanguin et $[C(a - v)]_{O_2}$ représente la différence artérioveineuse du contenu en oxygène. Le $\dot{V}O_2$ est donc influencé par le débit cardiaque, l'efficacité du réseau vasculaire et la capacité des tissus à extraire l'oxygène.

Un $\dot{V}O_{2\max}$ élevé permet donc de métaboliser une plus grande quantité de substrat et ainsi produire davantage d'énergie. C'est pourquoi ce paramètre physiologique est un élément central des évaluations d'athlètes, particulièrement ceux œuvrant dans des disciplines d'endurance. Sa plage de valeurs possibles chez les humains est large. Il a été mesuré à $10,1 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ chez des personnes âgées souffrant d'insuffisance cardiaque chronique (Peeters et al., 1996), et il a été mesuré à $96,7 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ chez un cycliste élite (Rønnestad et al., 2019).

Entre ces deux extrêmes, on retrouve les valeurs intermédiaires des populations actives. Par exemple, Robinson et al. (2018) ainsi que Thomas et al. (2018) l'ont mesuré chez des policiers de groupes tactiques d'intervention. Ceux-ci ont estimé un $\dot{V}O_{2\max}$ moyen de $51,1 \pm 4,4 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ en utilisant un test de navette (Léger & Lambert, 1982) et $44,8 \pm 5,3 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ par un test sous-maximal sur tapis roulant respectivement. Chez les pompiers, Gendron et al. (2015) ont mesuré un $\dot{V}O_{2\max}$ moyen de $47,8 \pm 5,3 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$. À titre de comparatif, le tableau suivant montre des valeurs pour différents niveaux de condition physique chez la population générale (SCPE, 2013).

Tableau 1*Classification du $\dot{V}O_{2max}$ par sexe et groupe d'âge.*

Groupe d'âge	Zone	Homme	Femme
20 à 29	Excellent	> 55,6	> 47,2
	Très bien	50,6 à 55,5	42,0 à 47,1
	Bien	47,2 à 50,5	37,8 à 41,9
	Acceptable	41,6 à 47,1	35,0 à 37,7
	Médiocre	< 41,6	< 35,0
30 à 39	Excellent	> 48,8	> 45,4
	Très bien	45,4 à 48,7	40,1 à 45,3
	Bien	40,1 à 45,3	36,0 à 40,0
	Acceptable	33,7 à 40,0	33,0 à 35,9
	Médiocre	< 33,7	< 33,0
40 à 49	Excellent	> 47,0	> 40,0
	Très bien	42,7 à 46,9	35,1 à 39,9
	Bien	35,5 à 42,6	31,9 à 35,0
	Acceptable	31,9 à 35,4	27,1 à 31,8
	Médiocre	< 31,9	< 27,1
50 à 59	Excellent	> 41,8	> 36,6
	Très bien	36,5 à 41,7	33,9 à 36,5
	Bien	30,1 à 36,4	31,0 à 33,9
	Acceptable	26,0 à 30,0	24,6 à 30,9
	Médiocre	< 26,0	< 24,6

Puissance critique et réserve énergétique supra-puissance critique

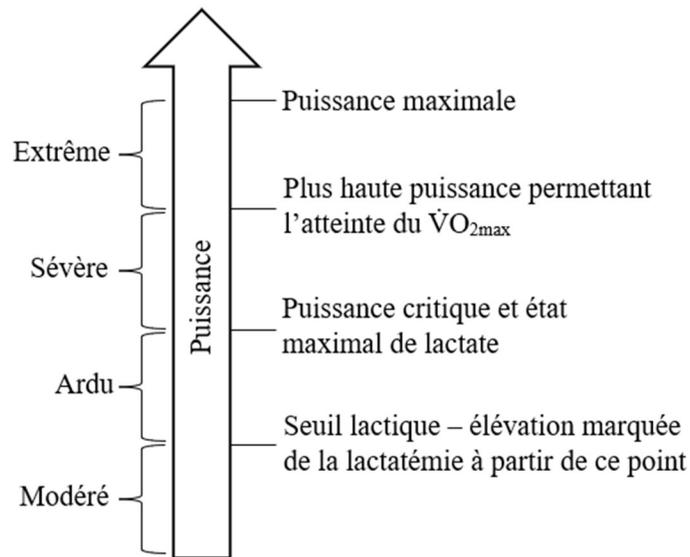
Le $\dot{V}O_{2max}$ est la mesure étalon pour quantifier la puissance du système cardiovasculaire. Bien que les fondements de ce concept aient été établis par Hill dans les années 1920 (Hale, 2008) et que sa signification au niveau physiologique soit bien comprise, son utilité pratique est plutôt limitée car la puissance associée au $\dot{V}O_{2max}$ (puissance aérobie maximale ou PAM) ne peut être maintenue plus que quelques minutes. C'est pourquoi le modèle de la puissance critique (PC) (Monod & Scherrer, 1965) est de

plus en plus utilisé par les physiologistes de l'exercice, les entraîneurs et les athlètes. La notion de puissance critique ne doit pas être interprétée comme concurrente au $\dot{V}O_{2max}$, mais plutôt comme un paramètre additionnel permettant une meilleure interprétation des phénomènes physiologiques. Chez une population en santé, la PC se situe approximativement à 70-80 % du $\dot{V}O_{2max}$ (Poole et al., 2016). Toutefois, ce pourcentage peut aller jusqu'à 90 % chez les athlètes d'endurance ou chez des patients atteints de maladies chroniques qui affectent le métabolisme aérobie.

Telle que représentée à la Figure 1, la PC sépare le domaine ardu, soutenable pendant une longue durée, du domaine sévère qui est insoutenable plus que quelques minutes. La PC représente aussi la puissance maximale qui peut être développée tout en maintenant les paramètres physiologiques stables : fréquence cardiaque, consommation d'oxygène, fréquence respiratoire, quotient respiratoire, saturation en oxygène au niveau systémique et musculaire, etc. (Pool et al, 2016). À cet égard, la notion de PC et d'état d'équilibre maximal de lactate (EEML) sont fondamentalement similaires bien que le EEML s'attarde uniquement à la lactatémie. Quelques études ont démontré que le EEML est corrélé à la PC, mais qu'il y est légèrement inférieur (Dekerle et al., 2003; Galán-Rioja et al., 2020; Pringle & Jones, 2002).

Figure 1

Représentation graphique des domaines de puissance



La PC est couplée à la réserve énergétique supra-puissance critique (W'). Celle-ci représente la quantité de travail qui peut être effectué à une puissance supérieure à la PC. Lors d'un effort physique à une intensité supérieure à la PC, l'interruption due à la fatigue survient lorsque le W' atteint une valeur nulle. La puissance maximale pouvant être déployée à partir de ce moment correspond à la PC. Considérant que celle-ci est produite essentiellement par les processus aérobie, il serait tentant d'en déduire que le W' provient des processus anaérobies. Toutefois, la littérature scientifique ne l'explique pas si simplement. Par exemple, Valli et al. (2011) ont noté une diminution du W' de 45 % lors de tests sur ergomètre à une altitude de 5050 m par rapport au niveau de la mer. Si une diminution de la PC était prévisible, une telle diminution du W' démontre bien que les filières énergétiques anaérobies n'expliquent pas la totalité de cette réserve énergétique.

La littérature scientifique explique le W' de plusieurs manières. Premièrement, sa taille est corrélée aux réserves d'adénosine triphosphate intra-musculaires et également au taux métabolique de la phosphocréatine (Chidnok et al, 2013). Le W' est aussi lié à l'accumulation de métabolites associés à la fatigue musculaire locale, tels le phosphate inorganique, l'adénosine diphosphate, les ions hydrogène (H^+) et les ions potassium (K^+). Les réserves d'oxygène musculaire et veineux contribuent aussi à la taille du W' . Finalement, la force et la puissance musculaire ont également un impact.

Utilisés conjointement, la PC et le W' permettent la prédiction du temps limite qu'une puissance P supérieure à la PC peut être maintenue :

$$T_{lim} = \frac{W'}{P-PC} \quad (2)$$

Cette équation est le modèle original à deux paramètres de Monod et Scherrer (1965). Ce modèle prédit un temps limite pratiquement infini pour une puissance qui est infinitésimalement supérieure à la PC, et une puissance infinie pour un temps limite s'approchant de 0 seconde. Par conséquent, ce modèle est défaillant aux conditions extrêmes. Morton et Billat (2013) ont apporté des modifications à ce modèle pour tenir compte de la puissance maximale instantanée (P_{max}) pouvant être développée.

$$T_{lim} = \frac{W'}{P-PC} + \frac{W'}{CP-P_{max}} \quad (3)$$

La PC et le W' ont été largement étudiés dans le domaine du cyclisme (Brickley et al., 2002), de la course à pied (Kolbe et al., 1995), de l'aviron (Kennedy & Bell, 2000)

et de la natation (Dekerle et al., 2002), mais elles n'ont jamais été étudiées pour la marche sur plan incliné avec charge.

L'inconvénient principal de l'utilisation du modèle PC-W' est qu'il est généralement nécessaire de réaliser plusieurs tests afin d'établir avec précision les valeurs de la PC et du W'. Ces tests peuvent prendre deux formes principales. La première requiert que l'athlète réalise un effort maximal pendant une durée donnée, par exemple, développer la plus haute puissance moyenne pendant un test de quatre minutes. La seconde méthode requiert que le participant maintienne une puissance constante jusqu'à l'épuisement. Pour que cette méthode soit valide, il faut toutefois que la puissance imposée résulte en un test d'une durée entre deux et 15 minutes (Vanhatalo et al., 2011). Le calcul de la PC et W' peut être effectué à partir de deux tests seulement (Simpson & Kordi, 2017), mais il est généralement recommandé d'en utiliser trois (Caputo & Denadai, 2008; Karsten et al., 2017; Galbraith et al., 2014) pour plus de précision. Des protocoles plus exhaustifs utilisant quatre (Hill et al., 2002) ou même six tests (Kolbe et al., 1995) peuvent aussi être utilisés. Bien que ceux-ci procurent davantage de fiabilité au résultat, ils sont beaucoup plus exigeants pour l'athlète et les personnes en charge d'administrer les tests.

Il est possible d'évaluer un individu en utilisant en une seule occasion le test maximal de trois minutes communément appelé « 3-min all-out test » (Vanhatalo et al., 2007). Toutefois, cela requiert que le paramètre mesuré, la puissance par exemple, évolue librement selon la fatigue croissante du participant. Or, sur un tapis roulant, il est

impossible de moduler instantanément la vitesse, la pente et la charge afin de suivre avec précision l'effort maximal que peut fournir le participant à tout moment du test. De plus, la puissance maximale que peut développer un individu en bonne condition physique est largement supérieure à celle du seuil de transition marche-course, d'où l'impossibilité d'effectuer un test maximal de trois minutes à la marche sur tapis roulant.

Évaluation de populations par la marche

Les capacités physiques de plusieurs populations ont été étudiées à la marche. Elle est plus souvent utilisée pour tester des personnes dont la santé est précaire. Dans ce contexte, le test à la marche cherche à évaluer le niveau d'autonomie fonctionnelle de la personne (Wu & Zhao, 2021), à évaluer sa $\dot{V}O_2$, et à suivre l'évolution de la condition physique dans le temps. Les protocoles les plus fréquemment utilisés sont les tests de six minutes (Enright, 2003), d'Ebbelling (Ebbelling et al., 1991) et de Bruce (Bruce et al., 1973). Le test de six minutes peut se dérouler dans un gymnase ou dans des couloirs dans la mesure où les changements de direction ne demandent pas de décélérer et de réaccélérer. Les tests d'Ebbelling et de Bruce sont réalisés sur tapis roulant et requièrent qu'il soit incliné pendant une partie du protocole. Malgré leur popularité, ces tests ne sont pas suffisamment exigeants pour déterminer le $\dot{V}O_{2max}$ des individus en meilleure condition physique des métiers d'urgence.

Chez les policiers membres de groupes tactiques d'intervention, Robinson et al. (2018) ont utilisé un test de marche de 5 km avec tous les équipements de protection habituels, pour une masse ajoutée de 25 kg. Ils ont également fait passer des tests mesurant la force absolue et relative (développé couché, traction à la barre, soulevé de terre, et squat), l'explosivité (saut vertical et sprint de 10m). Ils ont aussi fait le test de navette Léger (Léger & Lambert, 1982) où les policiers ont atteint en moyenne le palier 11,3, soit l'équivalent d'un $\dot{V}O_{2max}$ de $51,1 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$. Parmi tous ces tests, le test de navette était le plus corrélé avec la performance à la marche de 5 km, démontrant ainsi l'importance du $\dot{V}O_{2max}$ pour les déplacements avec charge chez cette population.

La marche sur tapis roulant incliné avec charge est une alternative intéressante pour mesurer le $\dot{V}O_{2max}$ d'individus entraînés. Klimek et Klimek (2007) ont comparé le $\dot{V}O_{2max}$ d'étudiants universitaires en bonne santé physique selon trois modes : course à pied sur tapis roulant avec augmentation de la vitesse à chaque palier, marche sur tapis roulant incliné à 12% avec augmentation de la masse portée à chaque palier, puis vélo stationnaire avec augmentation de la puissance à chaque palier. Chez les hommes, le $\dot{V}O_{2max}$ a été similaire pour la course, la marche à pied et le vélo, soit $61,0 \pm 5,5$ vs $60,4 \pm 5,0$ vs $60,2 \pm 8,9 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ respectivement. Chez les femmes, il y avait une différence significative entre les trois modes de test. Le $\dot{V}O_{2max}$ a été mesuré à $45,0 \pm 3,7$, $42,6 \pm 3,2$ et $40,1 \pm 3,4 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ respectivement. La corrélation entre le test à la course et le test à la marche a été de $r = 0,954$ ($p < 0,0001$). Klimek et Klimek (2007) expliquent que la différence entre les modes de test a été significative chez les femmes

uniquement par le fait que les incréments de charge entre chaque palier lors du test sur vélo étaient les mêmes pour les deux sexes, soit 20 W. Ceci a créé une augmentation de la charge relative plus grande pour les femmes, résultant en une fin de test plus hâtive. De plus, pour le test à la marche, le poids ajouté à chaque palier correspondait à 5% du poids corporel du participant. Considérant que le pourcentage de masse adipeuse est généralement supérieur chez la femme, cela crée une charge de travail augmentée par rapport à la masse maigre.

Ces résultats sont toutefois en opposition à ceux de Swearingen et al. (2018) qui ont comparé deux types de tests incrémentiels sur tapis roulant incliné. Le premier était réalisé à la marche avec une veste lestée de 15,9 kg alors que le second se faisait à la course sans charge. Lors du test à la marche lestée, la plus haute valeur de $\dot{V}O_2$ atteinte ($\dot{V}O_{2pic}$) a été de $42,7 \pm 6,2 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ alors que le test à la course a résulté en un $\dot{V}O_{2pic}$ significativement plus élevé de $47,8 \pm 6,3 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$. Les auteurs expliquent la différence marquée de ces résultats par le fait que les incréments à la marche étaient plus importants, et par conséquent, en fin de test, la fatigue musculaire des jambes aurait été l'élément limitant et non pas la puissance cardiovasculaire. La corrélation entre les deux protocoles de test était excellente avec une valeur de $r = 0,90$. Finalement, les participants réalisaient chaque protocole à deux reprises, permettant ainsi de calculer un coefficient de corrélation intra classe de 0,79 à la marche et de 0,87 à la course.

Par conséquent, un protocole de test incrémentiel à la marche sur plan incliné avec une charge permet de tester la puissance aérobie maximale d'individus en excellente condition physique. Des précautions doivent toutefois être prises pour que les incréments soient suffisamment petits afin d'éviter que la fatigue musculaire locale ne soit l'élément causant la fin du test.

Mécanique de la marche - vitesse, pente et charge

La marche requiert la coordination des membres inférieures qui interagissent selon le modèle du pendule inversé. Un effort musculaire est requis afin de propulser le corps vers l'avant par le pied arrière (Kuo et al., 2005). Ceci occasionne une élévation du centre de masse du corps et un déplacement vers l'avant. Puis, lors du contact du pied avant avec le sol, ce dernier doit exercer une force pour contrer la descente du centre de masse. Toutefois, cette force freine le déplacement horizontal du corps qui doit alors être compensé par une poussée du pied arrière.

Bien que le déplacement vertical du centre de masse sur un cycle de marche complet soit nul, le travail mécanique réalisé ne l'est pas (Burdett et al., 1983). Ceci implique que le travail métabolique sera affecté par la vitesse, la pente, et la charge transportée. À cet effet, Burdett et al. (1983) ont calculé que la puissance mécanique moyenne déployée est proportionnelle à la vitesse ($r = 0,90$), et à la vitesse au carré ($r = 0,89$). De manière similaire, le coût métabolique de la marche est fortement corrélé à la

vitesse au carré ($r = 0,93$). La corrélation entre l'efficacité énergétique et la vitesse est toutefois moins forte, à $r = 0,77$. On peut estimer que le coût énergétique le plus faible est approximativement $3,6 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ à une vitesse de $4,7 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Il est intéressant de constater qu'il s'agissait de la vitesse de marche que les participants choisissaient naturellement. Minetti et al. (2002) et Bastien et al. (2005) conviennent également que la vitesse de marche la plus économique est $4,7 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ chez les participants de leurs études. Cavagna et al. (1977) arrivent à une conclusion différente, c'est-à-dire que la vitesse de marche la plus économique se situe aux environs de $3,8 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. La différence peut être attribuable aux protocoles expérimentaux. Les études de Bastien et al. (2005) et de Minetti et al. (2002) utilisaient la calorimétrie indirecte pour déterminer le coût métabolique de marcheurs dans différentes conditions alors Cavagna et al. (1977) ont calculé le travail réalisé par analyse cinématique sur un échantillon de quatre personnes.

L'effet d'une pente sur la marche a également été étudié. Chez des femmes non-entraînées qui marchaient à $4,0 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, le $\dot{V}\text{O}_2$ est passé de $10,2 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ sur un tapis roulant sans inclinaison à $23,6 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ lorsque la pente passait à 15 % (Kravitz & McCormick, 2013). Lors de la marche sur un tapis roulant incliné à 10 %, Leroux et al. (2002) ont déterminé que, par rapport à la marche sans pente, il y avait une augmentation de la flexion à la hanche, aux genoux, et aux chevilles lors du contact initial ainsi qu'une antéversion du bassin et du tronc. De plus, la rotation du bassin dans le plan frontal diminuait, et finalement, la foulée s'allongeait avec l'augmentation de la pente. En conséquence, la sollicitation musculaire est modifiée comme l'ont démontré Lange et al.

(1996). Par rapport à la marche sur une surface plane, ils ont observé une augmentation moyenne de l'activité électromyographique de 125 % du vaste médial, de 109 % pour le vaste latéral, et 53 % du biceps fémoral, sans toutefois qu'il y ait de modification au niveau de l'ischio-jambier médial.

Sur une surface plane, aucune puissance mécanique n'est générée en raison de l'absence de déplacement vertical net lors d'un cycle complet de marche. Toutefois, la puissance supplémentaire requise pour marcher sur un plan incliné peut être calculée en appliquant les variables du déplacement d'une masse m à la vitesse v sur plan incliné à la définition usuelle de la puissance, $P = F \cdot v$:

$$P = g \cdot m \cdot v \cdot \sin(\arctan|i|) \quad (3)$$

où g est la constante gravitationnelle, $9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, et i est la pente exprimée en pourcentage. Cette équation a d'ailleurs été utilisée par Minetti et al. (2002). On constate donc que la puissance requise augmente proportionnellement à la masse, la vitesse, et à la pente.

L'ajout d'une charge portée sur le dos ou une combinaison du dos et de la poitrine a beaucoup été étudié chez la population générale (Abe et al., 2004; Bastien et al., 2005), mais plus particulièrement chez les militaires (Knapik et al., 2012; Robinson et al., 2018), les groupes tactiques d'intervention (Thomas et al., 2018) et les pompiers (Taylor et al., 2012). Les équipements portés par ces corps de métier pèsent généralement entre 15 kg et 25 kg, mais peuvent atteindre 46 kg dans certaines situations (Carlton et al., 2014; Knapik et al., 2012; Thomas et al., 2018). La puissance aérobie est le paramètre le plus important

pour transporter une charge sur une longue distance le plus rapidement possible comme le démontre la forte corrélation ($r = -0,712$) entre le test de navette (Léger & Lambert, 1982) et le temps requis pour marcher 5 km avec une charge de 25 kg (Robinson et al., 2012).

Spectroscopie dans le proche-infrarouge

La spectroscopie dans le proche infra-rouge (SPIR) est une technologie non-invasive qui permet de mesurer le niveau d'oxygénation musculaire locale à travers la peau. L'appareil peut être utilisé facilement en laboratoire ou dans un contexte sportif réel.

Contrairement à la calorimétrie indirecte qui donne un portrait des échanges gazeux sur l'ensemble du corps, la SPIR permet un aperçu des processus métaboliques qui surviennent dans la zone sondée. Son fonctionnement repose sur l'absorption d'ondes électromagnétiques à des fréquences spécifiques par l'hémoglobine et la myoglobine (Grassi & Quaresima, 2016).

Ainsi, lors d'un effort musculaire intense, la SPIR permet de détecter une diminution de l'oxyhémoglobine (O_2Hb) et une augmentation de la désoxyhémoglobine (HHb). La saturation musculaire en oxygène (SmO_2) ou TSI % pour *Tissue Saturation Index* est donc le reflet de l'activité aérobie locale. Par conséquent, en conjonction avec d'autres mesures physiologiques, elle peut permettre d'évaluer le niveau de sollicitation musculaire locale.

Toutefois, les valeurs mesurées par la SPIR pour le O₂Hb et le HHb n'ont pas de signification en soit, il s'agit d'unités arbitraires qui ne peuvent être comparées entre individus ou même entre deux séances d'exercices du même individu. Pour interpréter ces valeurs, il est nécessaire de procéder à une calibration physiologique telle que décrite par Hiroyuki et al. (2002). Cette calibration débute par la définition du niveau maximal d'O₂Hb musculaire et du niveau minimal de HHb. Pour se faire, le participant doit rester immobile et détendu pendant environ cinq minutes en limitant autant que possible son activité musculaire. Ensuite, une occlusion du membre où est placée la sonde est réalisée à l'aide d'un brassard pneumatique pressurisé à 250 mmHg pendant cinq minutes. Ceci permet d'amener le O₂Hb à sa valeur minimale correspondant à 0 % et le HHb à sa valeur maximale de 100 %. Suite au relâchement de l'occlusion et à la reprise des activités à l'étude, toutes les valeurs de O₂Hb et de HHb sont comparées à ces valeurs de référence.

OBJECTIFS

L'objectif primaire de la présente recherche consiste à appliquer les concepts de PC-W' à la marche inclinée avec charge chez des individus en santé. Ceci requiert d'abord de développer un protocole standardisé qui permet de déterminer les paramètres des tests. L'objectif sera considéré atteint si le protocole permet de déterminer la PC et W', s'il est précis, facile à administrer, et qu'il requiert un minimum de visites en laboratoire des participants.

L'objectif secondaire est d'évaluer l'impact sur la fiabilité de calculer la PC-W' à partir des résultats de deux tests seulement au lieu de plusieurs.

ARTICLE

Critical power applied to loaded inclined walking

Philippe Lacroix, Louis Laurencelle, Claude Lajoie*

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

*Auteur pour correspondance

Article original soumis dans *Ergonomics* le 6 février 2023

Critical power applied to inclined loaded walking

Abstract

The aim of this study was to apply the concept of critical power (CP) and the work that can be performed above CP (W') to inclined loaded walking. Eighteen physically active participants (age 32.2 ± 11.7 years; body mass 67.6 ± 14.0 kg) completed an incremental walking test (IT) and three constant-incline tests (CITs) on two separate days while wearing a load equivalent to 25% of their bodyweight. The IT and three CITs elicited a maximal effort as evidenced by the similar $\dot{V}O_{2\max/\text{peak}}$ ($p = 0.98$) and maximal heart rate ($p = 0.24$) attained. Statistical analysis revealed no difference when calculating CP with either the three CITs or any combination of two CITs ($p = 0.16$). However, using the short and long CITs to measure W' yielded the best results with no statistical difference ($p = 1.000$). The findings of this study may be useful to assess the fitness of firefighters, tactical police units, military personnel, mountain hikers, and other athletically inclined individuals for whom running is unsuitable.

Practitioner Summary

Firefighters, military personnel, and tactical police officers are required to carry a significant load on their back and shoulders. To assess and monitor their physical fitness, an inclined loaded walking test was devised. This test enables the calculation of critical power and W' .

Keywords

critical power, inclined walking, loaded walking, near-infrared spectroscopy

Funding details

None received.

Disclosure statement

The authors report there are no competing interests to declare.

Introduction

Since Monod & Scherrer (1965) first developed the theoretical framework, critical power (CP) has become a widely known concept. It is most commonly defined as the maximum rate of work that can be maintained without fatigue for a duration varying from 20 to 40 minutes, during which most or all physiological parameters stabilize. Additionally, W' represents the amount of work that can be produced above CP. The CP- W' model has been studied and used in cycling (Brickley et al., 2002; Caputo & Denadai, 2008), running (Caputo & Denadai, 2008; Kolbe et al., 1995), rowing (Kennedy & Bell, 2000), and swimming (Dekerle et al., 2002). However, to the authors' knowledge, it has not yet been studied in loaded walking. For healthy individuals, walking on a flat surface is not strenuous enough for CP to have any practical value. However, military personnel, tactical police officers, and firefighters often carry heavy loads which makes walking an exhausting task. For instance, military personnel and tactical police officers carry loads between 15 kg and 46 kg (Knapik et al., 2012), and firefighters carry approximately 22 kg (Gendron et al., 2015). Given that fitness is of critical importance to these occupations, there is a need for a fitness test that would replicate this physically demanding exertion. As such, the CP- W' model offers an attractive solution as it allows the prediction of performance for various power outputs.

The most common protocol to measure CP involves participants completing multiple exhausting trials lasting from 2 to 15 minutes (Goulding & Marwood, 2023; Vanhatalo et al., 2011). These trials are generally executed at an intensity of 75% to 105% (Vanhatalo et al., 2011) of the maximal aerobic power (MAP) or speed (MAS), although some studies have used up to 110% (Caputo & Denadai, 2008; Galbraith et al., 2014). The work produced during each trial is then plotted against time (t), allowing for the calculation of the slope and y-intercept, which are synonymous with CP and W' respectively, as defined by Monod & Scherrer (1965).

$$W = CP * t + W' \quad (1)$$

An apparent obstacle to measuring CP for walking is the walk-to-run transition speed, approximately $2.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Hreljac, 1993), which is too low to bring healthy individuals to exhaustion within a timeframe compatible with the CP- W' model. Additionally, walking on a flat surface yields a null mechanical power as there is no net vertical displacement. This can be circumvented with the use of a loaded inclined walk, which has two notable advantages. First, it elicits a cardiovascular response similar to cycling or running (Klimek & Klimek, 2007) even for very fit individuals. Second, it allows the calculation of work via the net relative vertical displacement.

Therefore, the primary objective of the current research is to investigate the feasibility of calculating CP and W' for loaded walking on an inclined treadmill.

The calculation of CP and W' typically requires three exhaustive tests (Caputo & Denadai, 2008; Karsten et al., 2017; Galbraith et al., 2014), although more time-consuming protocols using four (Hill et al., 2002) or even six (Kolbe et al., 1995) tests have been used, with the latter offering a greater degree of precision and robustness. CP and W' can theoretically be calculated using only two tests. However, results may be impacted more severely by each of the two tests. Therefore, an additional aim of this current study is to assess the impact of using only two tests on the accuracy of the results.

Materials and methods

Eighteen healthy and active individuals volunteered for this study, none of whom had significant prior experience walking on an inclined treadmill. The objectives of the study were clearly explained to the volunteers, including what was expected of them, following which they provided written and informed consent in accordance with the University's ethics committee.

On their first visit to the laboratory, the volunteers were weighed and measured. They filled out the Huet questionnaire (Léger et al., 1986; Trivel et al., 2004), which allowed an initial estimation of their maximal oxygen uptake ($\dot{V}O_{2\max}$) based on their lifestyle and athletic history.

Near-infrared spectroscopy

A near-infrared spectroscopy (NIRS) device (Portamon, Artinis, Netherlands) was placed on the antero-lateral surface of the right vastus lateralis, approximately 16 cm from the patella. Sampling rate was set at 10 Hz. To establish a baseline measure of oxyhemoglobin (O_2Hb), total hemoglobin (THb), and deoxyhemoglobin (HHb), the volunteers were asked to rest supine for five minutes. All further measures of O_2Hb , THb, and HHb were then compared to these baseline values and expressed as differences with the baseline values (ΔO_2Hb , ΔTHb and ΔHHb) in arbitrary units.

Multiple jumps test

Subsequently, the volunteers were asked to perform a 30-second multiple jumps test (MJ_{30}) (Bosco, 1983). To aid the analysis, a visual marker was placed on the right greater trochanter. With their hands placed laterally on their hips, they jumped vertically as high as they could for 30 seconds while a digital camera located five meters away recorded the exertion. Kinovea version 0.9.4, a validated motion analysis software (Puig-Divi, 2019), was used to calculate the total vertical displacement. This data, combined with the volunteer's mass, was then used to determine the total work done during the test.

Incremental and constant-incline tests

The volunteers were required to complete four physical tests on a treadmill over two days, with at least one full recovery day in between each test day. A weighted vest (Kensui Fitness, Sheridan, WY, USA) was worn by each participant, with the load evenly distributed on the front and back, and representing 25% of the individual's body weight. Heart rate (HR) was monitored using a belt (Garmin, Schaffhouse, Switzerland) worn around the chest. Oxygen uptake ($\dot{V}O_2$) and carbon dioxide output were measured with a metabolic analyzer (AEI Technology, Pittsburgh, PA, USA) during all the experimentations. The metabolic analyzer was calibrated as per the manufacturer's instructions prior to each test with gases of known concentrations. Data was averaged in 20-second intervals for $\dot{V}O_2$ and the respiratory exchange ratio (RER), whereas HR was recorded at a frequency of 1 Hz. The participants were considered to have reached their $\dot{V}O_{2max}$ if they achieved two of the three following criteria: 90% of the age-predicted maximal heart rate, final RER (RER_{end}) greater than 1.10, or the presence of a $\dot{V}O_2$ plateau at the end of the incremental test (Midgley et al., 2007). The age-predicted maximal heart rate was calculated by subtracting the participant's age from 220.

Every test began with a 5-minute warm-up on the treadmill set at $1.11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($4 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) and 1% incline. This allowed participants to become familiar with the task and the equipment they were wearing. After the warm-up, there was a 1-minute standing rest period which allowed the research team to set the parameters for the following test.

On day one, the first exertion was an incremental test (IT). For all participants, the treadmill incline was increased by 1% every minute while the speed was kept constant at $1.39 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) for every incline up to and including 18%. At 18%, the speed was increased to $1.53 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($5.5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$), after which subsequent steps were achieved by increasing the treadmill incline by 1% every minute. This speed increase in the protocol was intended to reduce the treadmill incline for more athletic individuals in order to minimize the differences in biomechanics, muscle recruitment and activation that may happen with varying levels of incline (McIntosh et al., 2006). The end of the IT was signaled by the volunteer grabbing onto the treadmill rails, at which point the treadmill was immediately stopped.

To determine the initial step of the IT, the research team began by using the previously estimated $\dot{V}O_{2max}$ and Pandolf's formula (Pandolf et al., 1977) to predict the final incline of the IT. Pandolf's formula correlates walking speed, incline, and load with metabolic power, which can be converted to $\dot{V}O_2$ given that 20.92 kJ requires 1 liter of oxygen. Then, the starting incline was calculated by subtracting 10% from the predicted final incline, aiming for an IT that would last between 8 and 12 minutes.

After a 60-minute rest, a second test was undertaken. This constant-incline test (CIT) was the first of three such tests, all of which were executed at $1.39 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ with the same equipment as during the IT, and with specific incline parameters. The warm-up was also kept identical. After

the warm-up, the volunteers were asked to walk on the inclined treadmill for as long as possible with energetic verbal encouragement until they reached maximal volitional fatigue.

On the second visit to the lab, the other two CITs were performed with slightly different inclines and were separated by a 60-minute recovery period.

The incline parameters of the CITs were determined as follows: the short constant-incline test (SCIT) used the incline of the last completed step of the IT, the intermediate constant-incline test (ICIT) used the incline of the last completed step of the IT minus 1%, and the long constant-incline test (LCIT) used the incline of the last completed step of the IT minus 2%. The sequences of the CITs were counterbalanced and randomly assigned to the volunteers so that each sequence would be done the same number of times. The volunteers were not informed of which CIT there were doing, the incline of the treadmill, the elapsed time since the beginning of the test, or any physiological parameters.

For every CIT, exertion time was noted. Power was calculated using the following equation:

$$P = 9.81 * v * (m + L) * \sin(\tan^{-1}(I)) \quad (2)$$

Equation 2. v = walking speed (m/s), m = volunteer's mass (kg), L = mass of loaded vest (kg), I = treadmill incline (%)

The work produced during each CITs was calculated and plotted against time. CP and W' were derived from the linear regression of the Work-Time graph for each volunteer, as per the two-parameter CP-model from Monod & Scherrer (1965).

Statistical analysis

Statistical analysis was performed using SPSS (version 28; IBM Inc. Chicago, IL, USA) and Microsoft Excel (version 2304, 16.0, Redmond, WA, USA). Values are presented as mean \pm standard deviation. A one-way analysis of variance was conducted on the volunteers' biometrics and various tests results. Multiple linear regression models, Pearson correlations and bivariate correlation analysis were conducted for specific parameters. A post hoc Bonferroni analysis was performed on the RER, CP and W' values for various results. The level of statistical significance was set at $p < 0.05$.

Results

The anthropometric and physiological characteristics of the volunteers are presented in Table 1. It was found that height, weight, and estimated $\dot{V}O_{2\max}$ were all significantly different between men and women ($p < 0.05$).

The participants completed the two test days in an average of 7.2 ± 2.9 days. Some reported mild to moderate lower back pain during the last steps of the IT and LCIT. A few participants experienced throat dryness due to the breathing mask. However, none of them stated these physical inconveniences as the main reason for stopping the test.

Table 1

Volunteers Biometrics

	Men	Women	Total
Number of volunteers	10	8	18
Height (m)	1.77 ± 0.08	$1.61 \pm 0.06^*$	1.70 ± 0.11
Weight (kg)	75.6 ± 9.8	$57.5 \pm 12.1^*$	67.6 ± 14.0
Age (years)	30.0 ± 13.8	34.9 ± 8.7	32.2 ± 11.7
BMI ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	24.2 ± 2.0	22.1 ± 3.3	23.3 ± 2.8
Estimated $\dot{V}O_{2\max}$ ($\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)	54.8 ± 10.2	$39.6 \pm 4.4^*$	48.0 ± 11.1

* $p < 0.05$ between men and women

Incremental tests

All participants reached their $\dot{V}O_{2\max}$. Both maximal aerobic power (MAP) and relative maximal aerobic power (rMAP) were correlated with $\dot{V}O_{2\max}$, with rMAP's correlation being stronger ($r = 0.906$, $p < 0.001$ vs $r = 0.649$, $p = 0.004$). **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** shows rMAP's correlation with $\dot{V}O_{2\max}$ whereas Table 2 shows the main descriptive characteristics of the IT and physiological measures.

Figure 1

Relative Maximal Aerobic Power (rMAP) vs Measured $\dot{V}O_{2max}$.

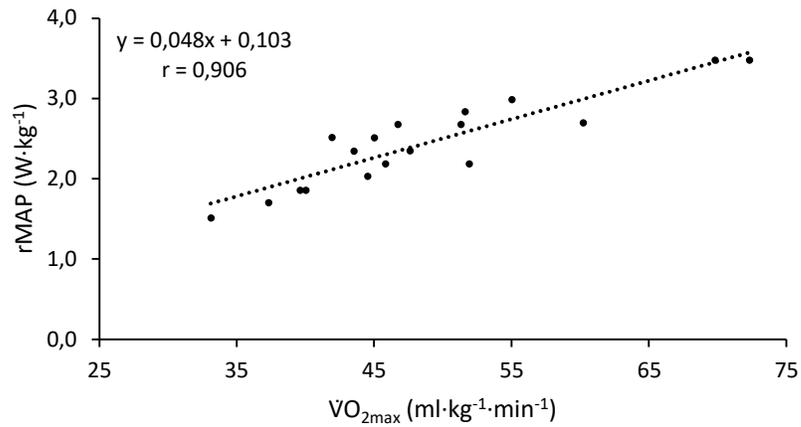


Table 2

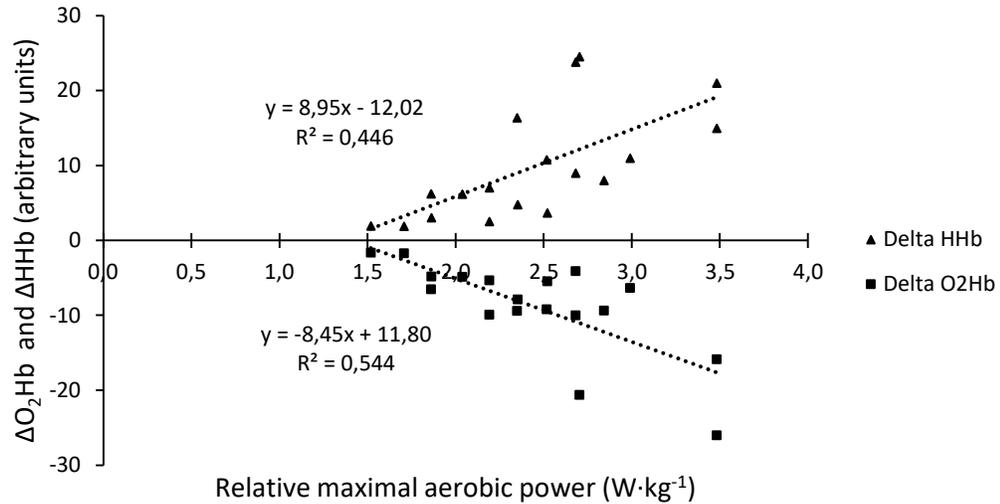
Incremental Test (IT) Results

Test duration (excluding warm-up) (s)	617.9 ± 164.5
Last completed incline (%)	14.4 ± 3.1
$\dot{V}O_{2max}$ (ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	48.7 ± 10.4
RER _{end}	1.13 ± 0.04
Power at last completed incline (W)	164.1 ± 46.5
Relative power at last completed incline (W·kg ⁻¹)	2.44 ± 0.55

As can be seen on **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, there is a strong correlation between rMAP and the levels of ΔO_2Hb ($r = 0.74$, $p < 0.01$) and ΔHHb ($r = 0.68$, $p < 0.01$) attained in the last 5 seconds of the IT.

Figure 2

ΔO_2Hb and ΔHHb versus Relative Maximal Aerobic Power



Constant incline tests

Criteria for $\dot{V}O_{2max}$ were not met for all CITs; therefore, they were considered to be $\dot{V}O_{2peak}$. However, there was no statistical difference between the ITs' $\dot{V}O_{2max}$ and the CITs' $\dot{V}O_{2peak}$ ($p = 0.982$), nor was there a difference between maximal HR during each test (HR_{max}) ($p = 0.244$). Similarly, the levels of ΔO_2Hb (ΔO_2Hb_{end}) and ΔHHb (ΔHHb_{end}) during the last 5 seconds of each exertion were similar with a non-significant difference for both ΔO_2Hb_{end} ($p = 0.456$) and ΔHHb_{end} ($p = 0.975$). Therefore, constant incline loaded walks on a treadmill can elicit a maximal effort in a similar way to an incremental test. Table shows the main metrics for all four tests.

Table 3*Incremental (IT) and Constant-Incline Test (CIT) Results*

Variable	IT	SCIT	ICIT	LCIT
Test duration (s)	617.9 ± 164.5	258.7 ± 83.0	386.3 ± 132.9	541.5 ± 239.5
Relative power (W·kg ⁻¹)	N/A	2.45 ± 0.56	2.28 ± 0.56	2.10 ± 0.53
$\dot{V}O_{2\max/\text{peak}}$ (ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	48.8 ± 10.4	48.2 ± 10.5	48.0 ± 9.9	47.3 ± 10.4
RER _{end}	1.13 ± 0.04	1.15 ± 0.08*	1.08 ± 0.08*	1.05 ± 0.07*
HR _{max} (bpm)	185.6 ± 12.4	177.5 ± 12.4	180.2 ± 11.3	181.2 ± 11.2
$\Delta O_2Hb_{\text{end}}$	-8.821 ± 6.327	-7.454 ± 5.480	-7.522 ± 7.049	-5.299 ± 7.373
ΔHHb_{end}	9.839 ± 7.411	10.408 ± 7.503	10.990 ± 8.794	10.764 ± 7.851

* $p < 0.05$; LCIT significantly different from IT and SCIT. ICIT significantly different from SCIT.

When considering all four walking tests, the coefficients of variation were low for both $\dot{V}O_{2\max/\text{peak}}$ and HR at 1.22% and 1.86% respectively. This again demonstrates the potential for all four tests to elicit a maximal effort in all participants.

The analysis of variance revealed a significant difference between the RER_{end} for all four tests ($p < 0.001$). Post hoc Bonferroni analysis showed that the RER_{IT} was significantly different from RER_{LCIT} ($p = 0.004$) and that RER_{SCIT} was significantly different from both RER_{ICIT} ($p = 0.039$) and RER_{LCIT} ($p < 0.001$).

Critical power and W'

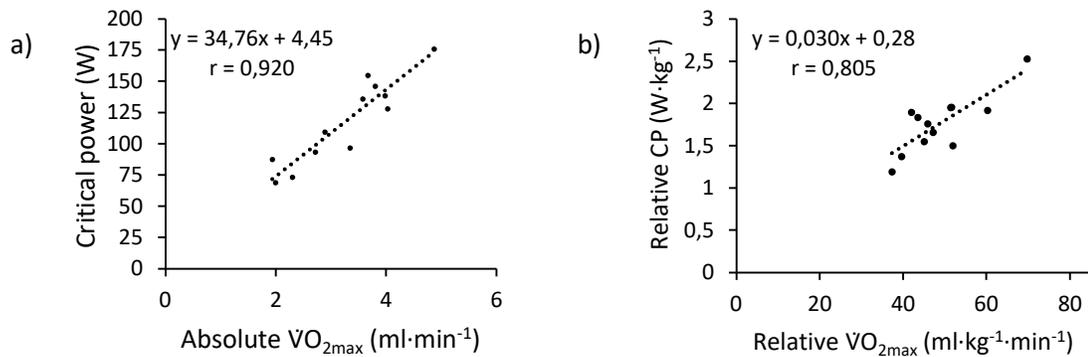
For any maximal constant power test above CP, work produced is expected to be proportional to test duration. For 12 of the 18 volunteers, this expectation was met for every CITs. For these participants, the average Pearson's coefficient of correlation for the three data points on the Work-Time graph was 0.997 ± 0.003 , and therefore, CP and W' were calculated using all three CITs. However, six of the volunteers produced less work during one of their CITs than during one of their other CITs that had a steeper incline. Therefore, the CIT that produced an unexpectedly low total work was considered to be a sub-maximal effort. For example, if work produced during LCIT was lower than the work produced during ICIT, LCIT was deemed a sub-maximal effort, and therefore invalid. The results of these volunteers were removed from the subsequent analysis of CP-W'. These participants and the causes for their sub-maximal test will be discussed later.

For the 12 participants who performed three valid CITs, CP was calculated as the slope of the regression of each individual Work-Time graph. As shown on Figure 3, there was a very strong and significant relationship between CP and absolute $\dot{V}O_{2\max}$ ($r = 0.920$, $p < 0.001$) and between

the relative critical power (rCP) and relative $\dot{V}O_{2max}$ ($r = 0.805$, $p = 0.002$). Table 4 shows the CP-related results for both men and women.

Figure 3

a) CP vs absolute $\dot{V}O_{2max}$ and b) rCP vs relative $\dot{V}O_{2max}$



W' was calculated as the y-intercept of the Work-Time graph. It averaged $11,7 \text{ kJ} \pm 4.7 \text{ kJ}$. W' was moderately correlated to the work performed during the MJ₃₀ test and it approached significance ($r = 0.530$, $p = 0.076$).

Table 4

rMAP, rCP, Ratio of rCP and rMAP, and W'

Variable	Men	Women	Total
rMAP ($\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$)	2.60 ± 0.54	2.25 ± 0.54	2.44 ± 0.55
CP (W)	139.6 ± 24.4	$90.0 \pm 16.2^*$	117.6 ± 34.1
rCP ($\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$)	1.88 ± 0.32	1.70 ± 0.33	1.76 ± 0.35
rCP/rMAP (%)	0.74 ± 0.04	0.70 ± 0.05	0.72 ± 0.05
W' (kJ)	14.1 ± 4.5	$8.3 \pm 2.5^*$	11.7 ± 4.7

Note. All values except rMAP were calculated for the 12 participants who had coherent CITs.

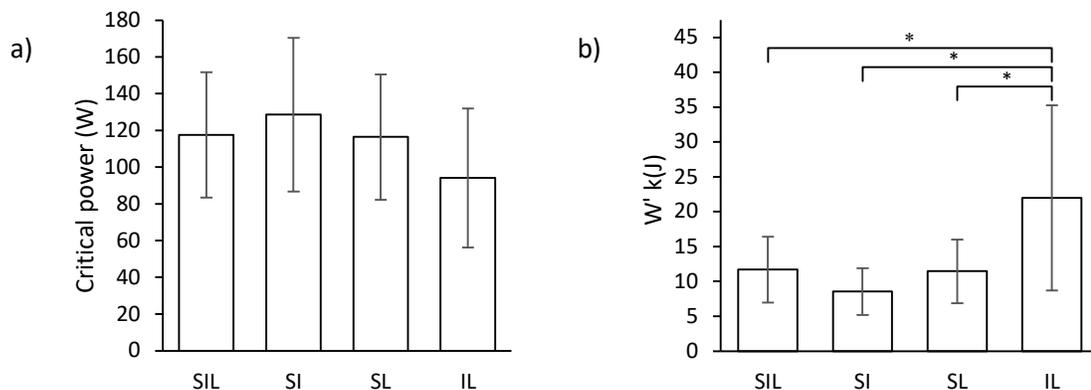
* $p < 0.05$ between men and women

Two vs three tests

Given that the three CITs require a significant amount of time and effort from the participants and health professionals, it would be beneficial if only two CITs were necessary to calculate CP and W' with acceptable accuracy. Therefore, CP and W' were calculated using the three CITs, as well as all three possible combinations of two CITs: Short-Intermediate (SI), Short-Long (SL), and Intermediate-Long (IL). An analysis of variance was performed using the results of the 12 participants who had coherent Work-Incline CITs in order to detect any significant variations. The analysis of variance revealed no significant difference in all four methods of calculating CP ($p = 0.158$), with a moderate coefficient of variation of 11.1%. The same calculation was conducted with regards to W' where a significant difference was observed ($p < 0.001$). A Bonferroni analysis revealed the following significant differences: SIL-IL ($p = 0.009$), SI-IL ($p < 0.001$), and SL-IL ($p = 0.008$). It is also noteworthy that the standard deviation was much higher for IL than any other combination of tests (13.3 kJ for IL vs 4.7, 3.4 and 4.56 kJ for SIL, SI, and SL respectively). The coefficient of variation was much higher at 43.9%.

Figure 4

a) CP and b) W' as Calculated from All Combinations of Tests



Legend: * Significantly different ($p < 0.05$)

Discussion

To our knowledge, this study is the first to apply the concept of CP- W' to inclined loaded walking. The first step was to find a standardized method to determine appropriate parameters for the three CITs. Preliminary unpublished work led the research team to a graded test at a speed of $1.39 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, where the incline is increased by 1% every minute until volitional fatigue. This protocol allowed for a gradual increase in $\dot{V}O_2$, HR and power, conveniently using the last three

increments as parameter for the CITs. Consequently, the CITs' $\dot{V}O_{2peak}$ were closely matched with the individuals' $\dot{V}O_{2max}$ with a non-significant difference and a small coefficient of variation. Maximal heart rate attained during the CITs were also very similar to the IT's maximal heart rate. Finally, the values of ΔO_2Hb_{end} and ΔHb_{end} were also similar for all four tests, which again, lends credibility to the fact that all four exertions elicited a maximal effort. With regards to physiological parameters, only the RER_{end} differed between the IT and the CITs. More specifically, only the ICIT's and LCIT's RER_{end} differed from the IT's.

The adequacy of these CITs parameters can be seen from their duration which are evenly spread within the recommended exhaustion times of 120 to 900 seconds (Vanhatalo et al., 2011): 258.7 ± 83.0 , $386.3 \pm 132.9s$, and $541.5 \pm 239.5s$ for the SCIT, ICIT, and LCIT respectively. In comparison, the average duration for SCIT, 258.7 ± 83.0 , is vastly superior to the lowest exercise duration of $209 \pm 29s$ that allowed attainment of $\dot{V}O_{2max}$ for untrained cyclists in a study by Caputo & Denadai (2008), or $136 \pm 17s$ by Hill et al. (2002). This supports the idea that cardiorespiratory power was the limiting factor, and not muscular strength or endurance. Furthermore, the SCIT's power corresponds to the MAP, while the ICIT's and LCIT's power correspond on average to $92.6\% \pm 1.4\%$ and $85.4\% \pm 2.2\%$ of the MAP respectively. This is also in line with the typical values of 75% to 105% of the MAP (Vanhatalo et al., 2011). Therefore, we can safely conclude that the parameters for the CITs and the manner by which they were determined were appropriate for calculating CP and W' .

For 12 of the 18 participants, the CITs' results enabled the calculation of CP and W' . As expected, CP ($r = 0.920$) and rCP ($r = 0.805$) were strongly correlated with $\dot{V}O_{2max}$. This is slightly higher than the results of Kolbe et al. (1995) who found a correlation of 0.77 ($p < 0.001$) between critical speed and $\dot{V}O_{2max}$ in trained runners. On average, CP corresponded to $71.9 \pm 5.0\%$ of MAP. This result is practically identical to that of Pringle & Jones (2002) who found CP was $71.0 \pm 3.0\%$ of MAP for healthy young adult cyclists and is consistent with the expected values in the literature (Poole et al., 2016; Vanhatalo et al., 2011).

It is expected that a steeper incline should result in a shorter CIT, and thus, less work produced. However, that condition was not met for six of the 18 volunteers. These volunteers produced less work during their ICIT than during SCIT, or less work during LCIT than ICIT. It was concluded that these volunteers had underperformed for that specific test, and therefore, it was deemed submaximal and invalid. In four of these six occurrences, the submaximal CIT was executed on the first day of testing after the IT. This appears to be the most common characteristic amongst the invalid CITs. Neither age, sex, $\dot{V}O_{2max}$, or sequence of the CITs seemed to explain this abnormality. The reasons for these inconsistencies are unclear. It can be hypothesized that the IT's longer duration caused additional fatigue that was carried over to the second test of the day. As shown on **Table**, participants reached similar $\dot{V}O_{2max}$ and HR_{max} in all four tests whereas RER_{end} was inversely proportional to test duration. For most participants, this meant that RER_{end} was also proportional to the incline. However, for the six participants who underperformed on one

CIT, RER_{end} was inversely proportional to test duration but not proportional to test incline, i.e. some participants had a lower RER_{end} during a steeper CIT than during a gentler one. A possible explanation is that fatigue incurred during the IT may have impaired the mechanical efficiency of the gait. It has been reported that fatigue has a deleterious effect on running economy (Burgess et al., 2010) and therefore, requires additional metabolic work to be performed for the same mechanical power output.

The effect of the recovery period between multiple incremental tests (Scharhag-Rosenberger et al., 2014), and multiple constant power tests (Karsten et al., 2017; Galbraith et al., 2014) on CP and W' has been studied. Scharhag-Rosenberger et al. (2014) found that MAP and blood lactate concentration decreased gradually during four incremental cycling tests separated by a recovery period of 90 minutes in untrained cyclists, but not in trained cyclists. Karsten et al. (2017) studied the effect of rest duration between three constant power tests on CP and W' . They found that CP was not different between test protocols with either a 24-hour, 3-hour, and 30-minute inter-test recovery period. However, in that study, W' showed a low level of agreement between the different protocols. Galbraith et al. (2014) obtained similar results for runners where critical speed was not different between a 30-minute and a 60-minute rest. He also found that the distance travelled at a pace above critical speed (D') showed a higher coefficient of variation of 13.3%. However, no studies have been found detailing the effect of an incremental test on a subsequent constant power test.

Hence, we may hypothesize that 60 minutes of recovery between the IT and the first CIT may not have been sufficient for all participants. However, caution should be exercised when extrapolating conclusions from these studies, as they were conducted with runners (Galbraith et al., 2014) and cyclists (Scharhag-Rosenberger et al., 2014; Karsten et al., 2017). It is worth noting that the IT did not appear to have impaired the performance of the remaining 12 participants, as evidenced by the very high average Pearson coefficient of correlation of 0.997 ± 0.003 . Furthermore, on the second day, the first CIT did not seem to negatively affect the second one for 17 of the 18 participants. Therefore, we can cautiously assume that the CP calculated in the present study was not affected by the 60-minute rest for most participants, but a longer recovery period may have been necessary between the IT and the following CIT.

The second objective of this study was to evaluate the possibility of using only two CITs to accurately measure CP and W' . It was seen that CP could be calculated from any combination of two tests without a significant difference and a moderate coefficient of variation between all four methods of calculation. However, only the calculation of W' based on SCIT and LCIT was a valid alternative to using all three CITs. Therefore, health professionals wanting to assess CP and W' should favor SCIT and LCIT for more reliable results. Simpsons et al. (2017) arrived at similar conclusions. Using a cycle ergometer, participants performed three time-trials of three, five and twelve minutes. Calculation of CP using either the three- and twelve-minute trials resulted in practically identical values for CP (283 ± 66 W vs 282 ± 65 W) and W' (18.7 ± 6.2 kJ and 18.3 ± 6.3

kJ). The durations of three and twelve minutes are similar to those of SCIT (4min19) and LCIT (9min01). Therefore, it is satisfactory to use only two tests as long as there is a large difference in their duration while remaining within the range of two to fifteen minutes, as recommended by Vanhatalo et al. (2011).

Irrespective of the calculation of CP and W' , the IT on its own has some features of interest. As seen on **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, there is a strong and significant correlation between the $\dot{V}O_{2max}$ and the rMAP. Therefore, health professionals without a metabolic cart can make use of this regression to assess a patient's cardiorespiratory fitness.

The values derived from the NIRS device have been shown to be valid indicators of the level of activity of aerobic metabolism during exercise. As such, it is not unexpected to see that higher levels of performance in the IT were correlated to greater ΔO_2Hb and ΔHHb . Similar findings have been reported by Gendron et al. (2018) with cyclists, and Borges et al. (2015) and Paquette et al. (2018) with canoeists and kayakers.

Conclusion

To the authors' knowledge, this is the first study to attempt to apply the CP- W' concept to inclined loaded walking. The testing protocol consisted of an incremental test on the first day, followed by a constant-incline test, and two additional constant-incline tests on the second day. Most participants were able to complete all four tests and perform sufficiently well to enable the calculation of CP and W' . As with other modes of exercise, critical power and relative critical power were both strongly correlated to $\dot{V}O_{2max}$. This could ultimately lead to a test protocol that focuses mainly on critical power and W' rather than the more unidimensional $\dot{V}O_{2max}$. The incremental test served mainly as a way to select the constant-incline tests' parameters and to measure the main physiological variables in this research context. It was seen that a two-test protocol can yield the same CP- W' as a three-test protocol. Therefore, a simplified version could be used. This would have all the same benefits while being less time-consuming for all the parties involved. Finally, this first attempt at an inclined loaded walking CP- W' protocol can provide substance for organizations that need to test firefighters, tactical police units, military personnel, mountain hikers, and any other athletic individuals for whom running may be unsuitable.

Acknowledgements

We would like to thank Philippe Gendron for his insight and perspective regarding various matters related to this study. We would also like to acknowledge the invaluable help of laboratory assistants Frederic Croteau-Caron, Philippe Pharand, and Ana Sauriol-Gauthier.

Declaration of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

Bosco, C., Luhtanen, P., & Komi, P. V. (1983). A simple method for measurement of mechanical power in jumping. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 50(2), 273-282.

Brickley, G., Doust, J., & Williams, C. (2002). Physiological responses during exercise to exhaustion at critical power. *European Journal of Applied Physiology*, 88(1), 146-151.

Burgess, T. L., & Lambert, M. I. (2010). The effects of training, muscle damage and fatigue on running economy. *International SportMed Journal*, 11(4), 363-379.

Caputo, F., & Denadai, B. S. (2008). The highest intensity and the shortest duration permitting attainment of maximal oxygen uptake during cycling: effects of different methods and aerobic fitness level. *European Journal of Applied Physiology*, 103(1), 47-57.

Charmant, (2021). Kinovea (Version 0.9.4) [Computer software]. Available from <http://www.kinovea.org/>

Dekerle, J., Sidney, M., Hespel, J. M., & Pelayo, P. (2002). Validity and reliability of critical speed, critical stroke rate, and anaerobic capacity in relation to front crawl swimming performances. *International Journal of Sports Medicine*, 23(02), 93-98.

Galbraith, A., Hopker, J., Lelliott, S., Diddams, L., & Passfield, L. (2014). A single-visit field test of critical speed. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 9(6), 931-935.

Gendron, P., Freiberger, E., Laurencelle, L., Trudeau, F., & Lajoie, C. (2015). Greater physical fitness is associated with better air ventilation efficiency in firefighters. *Applied Ergonomics*, 47, 229-235.

Gendron, P., Laurencelle, L., Trudeau, F., & Lajoie, C. (2018). Deoxy [Hb+ Mb] increases consistently up to peak oxygen consumption in elite cyclists. *International Journal of Applied Sports Sciences*, 30(1), 11-19.

Goulding, R. P., & Marwood, S. (2023). Interaction of factors determining critical power. *Sports Medicine*, 1-19.

- Hill, D. W., Poole, D. C., & Smith, J. C. (2002). The relationship between power and the time to achieve VO₂ max. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 34(4), 709-714.
- Hreljac, A. (1993). Preferred and energetically optimal gait transition speeds in human locomotion. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 25(10), 1158-1162.
- Karsten, B., Hopker, J., Jobson, S. A., Baker, J., Petrigna, L., Klose, A., & Beedie, C. (2017). Comparison of inter-trial recovery times for the determination of critical power and W' in cycling. *Journal of Sports Sciences*, 35(14), 1420-1425.
- Kennedy, M. D., & Bell, G. J. (2000). A comparison of critical velocity estimates to actual velocities in predicting simulated rowing performance. *Canadian Journal of Applied Physiology*, 25(4), 223-235.
- Klimek, A. T., & Klimek, A. (2007). The weighted walking test as an alternative method of assessing aerobic power. *Journal of Sports Sciences*, 25(2), 143-148.
- Knapik, J. J., Harman, E. A., Steelman, R. A., & Graham, B. S. (2012). A systematic review of the effects of physical training on load carriage performance. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 26(2), 585-597.
- Kolbe, T., Dennis, S. C., Selley, E., Noakes, T. D., & Lambert, M. I. (1995). The relationship between critical power and running performance. *Journal of Sports Sciences*, 13(3), 265-269.
- Léger, L., Huet, B., & Cloutier, J. (1986). Prediction of maximal power from a health and lifestyle questionnaire. *Canadian Journal of Applied Sport Sciences*, 11, 25.
- McIntosh, A. S., Beatty, K. T., Dwan, L. N., & Vickers, D. R. (2006). Gait dynamics on an inclined walkway. *Journal of Biomechanics*, 39(13), 2491-2502.
- Midgley, A. W., McNaughton, L. R., Polman, R., & Marchant, D. (2007). Criteria for determination of maximal oxygen uptake. *Sports medicine*, 37(12), 1019-1028.
- Monod, H., & Scherrer, J. (1965). The work capacity of a synergic muscular group. *Ergonomics*, 8(3), 329-338.
- Pandolf, K. B., Givoni, B., & Goldman, R. F. (1977). Predicting energy expenditure with loads while standing or walking very slowly. *Journal of Applied Physiology*, 43(4), 577-581.

Poole, D. C., Burnley, M., Vanhatalo, A., Rossiter, H. B., & Jones, A. M. (2016). Critical power: an important fatigue threshold in exercise physiology. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *48*(11), 2320.

Pringle, J. S., & Jones, A. M. (2002). Maximal lactate steady state, critical power and EMG during cycling. *European Journal of Applied Physiology*, *88*(3), 214-226.

Puig-Diví, A., Escalona-Marfil, C., Padullés-Riu, J. M., Busquets, A., Padullés-Chando, X., & Marcos-Ruiz, D. (2019). Validity and reliability of the Kinovea program in obtaining angles and distances using coordinates in 4 perspectives. *PLoS One*, *14*(6), e0216448.

Scharhag-Rosenberger, F., Carlsohn, A., Lundby, C., Schüler, S., Mayer, F., & Scharhag, J. (2014). Can more than one incremental cycling test be performed within one day?. *European Journal of Sport Science*, *14*(5), 459-467.

Simpson, L. P., & Kordi, M. (2017). Comparison of critical power and W' derived from 2 or 3 maximal tests. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *12*(6), 825-830.

Trivel, D., Calmels, P., Léger, L., Busso, T., Devillard, X., Castells, J., & Denis, C. (2004). Validity and reliability of the Huet questionnaire to assess maximal oxygen uptake. *Canadian Journal of Applied Physiology*, *29*(5), 623-638.

Vanhatalo, A., Jones, A. M., & Burnley, M. (2011). Application of critical power in sport. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *6*(1), 128-136.

DISCUSSION GÉNÉRALE

À notre connaissance, cette étude est la première à appliquer les notions de puissance critique (PC) et de réserve énergétique supra-puissance critique (W') à la marche inclinée avec charge. Considérant que l'évaluation de la condition physique à la marche a le potentiel d'être applicable à plusieurs emplois physiquement exigeants où la marche est de mise, il était pertinent de concevoir un protocole d'effort qui permet de mesurer la PC et le W' . Ceux-ci sont des mesures qui sont utilisées dans de nombreuses activités sportives comme le cyclisme et la course à pied, afin de planifier et faire le suivi des entraînements, ainsi que d'apprécier la charge d'entraînement à court et moyen terme.

Un des défis de cette étude était d'arriver à sélectionner adéquatement et méthodiquement les paramètres des tests qui permettaient des efforts maximaux pour chacun des tests. Une estimation préliminaire du $\dot{V}O_{2\max}$ était requise avant d'entreprendre les tests maximaux afin que ceux-ci soient d'une durée appropriée. Pour ce faire, nous avons utilisé le questionnaire de Huet (Léger et al., 1986). Celui-ci a permis une estimation ($48,0 \pm 11,1 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$) assez juste du véritable $\dot{V}O_{2\max}$ ($48,7 \pm 10,4 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$). Par la suite, la formule de Pandolf (Pandolf et al., 1977) a permis de faire le lien entre le $\dot{V}O_{2\max}$ estimé et la prédiction des paramètres du dernier palier du test incrémentiel (TI). Par conséquent, le TI a été d'une durée moyenne de $10\text{min}18 \pm 2\text{min}45$, ce qui se situe à l'intérieur ou près des valeurs suggérées d'environ huit à dix minutes (Astorino et al., 2004; Yoon et al., 2007) pour la majorité des participants. De plus, il aurait été possible que la fatigue musculaire locale au niveau des jambes ou du dos soit l'élément limitant de

l'effort physique, surtout chez les participants qui ont atteint un haut niveau d'inclinaison du tapis roulant. Or, ce ne fut pas le cas car le TI a élicité chez tous les participants un effort aérobie maximal, comme en témoigne l'atteinte d'au moins deux des trois critères usuels : 90% de la fréquence cardiaque maximale (FC_{max}) estimée par l'âge, un quotient respiratoire (QR) final supérieur à 1,1, ou la présence d'un plateau du $\dot{V}O_2$ à la fin du test.

Le niveau d'oxygénation musculaire (SmO_2), le volume de sang oxygéné (O_2Hb) et désoxygéné (HHb) sont des indicateurs du métabolisme intramusculaire et systémique. Les différences de O_2Hb (ΔO_2Hb) ($r = 0,74$, $p < 0,01$) et de HHb (ΔHHb) ($r = 0,68$, $p < 0,01$) entre la fin du TI et la valeur de référence étaient fortement et significativement corrélées à la puissance aérobie maximale relative au poids des individus (PAMr). Des résultats similaires ont été décrits par Gendron et al. (2018) chez des cyclistes, et par Borges et al. (2015) et Paquette et al. (2018) chez des canoéistes et kayakistes. Ceci permet de supposer que, lors de test incrémentiel à la marche inclinée avec charge, tout comme dans d'autres types d'activité, les participants qui ont une plus grande puissance aérobie sont aussi ceux dont les muscles squelettiques utilisent le mieux l'oxygène.

Les paramètres des tests à pente constante (TPC) ont également été choisis adéquatement. Ceux du test à pente constante court (TPCC) correspondaient au dernier palier du TI, alors que 1% et 2% ont été soustraits à la pente du dernier palier du TI pour obtenir celles du test à pente constante intermédiaire (TPCI) et du test à pente constante long (TPCL) respectivement. Ceci a permis d'obtenir des tests d'une durée variant de $4min17 \pm 1min23$ pour le TPCC à $9min01 \pm 4min00$ pour le TPCL. Ces valeurs sont dans

les plages recommandées de deux à 15 minutes pour les tests visant à déterminer la PC (Vanhatalo et al., 2011).

Les TPC ont permis d'atteindre le $\dot{V}O_{2pic}$ et non le $\dot{V}O_{2max}$. La différence réside principalement dans le QR atteint à la fin du test, et ce, principalement entre le TI et le TPCL ($1,13 \pm 0,04$ vs $1,05 \pm 0,07$). Les valeurs de $\dot{V}O_{2max}$ et $\dot{V}O_{2pic}$ étaient toutefois très similaires. De plus, toutes les autres mesures physiologiques tels que la FC et les niveaux de ΔO_2Hb et de ΔHHb à la fin des tests étaient similaires pour les quatre tests sur tapis roulant. Il convient toutefois d'être prudent dans l'interprétation des valeurs d'oxygénation musculaire car celle-ci sont très variables chez les individus, mais aussi entre eux, ce qui diminue la puissance du test statistique.

Pour chacun des participants, il était attendu qu'un TPC soit de plus courte durée lorsque le tapis roulant était plus incliné. Pour 12 des 18 participants, ce fut effectivement le cas pour les trois tests; pour chacun d'eux, la durée était inversement proportionnelle à la pente. De plus, le travail réalisé pendant les TPC était fortement corrélé à sa durée (moyenne de $r = 0,997 \pm 0,003$). Chez ces participants, la PC était fortement et significativement corrélée au $\dot{V}O_{2max}$ absolu ($r = 0,920$, $p < 0,001$) et relatif ($r = 0,805$, $p = 0,002$). Ces résultats sont supérieurs à ceux obtenus par Kolbe et al. (1995) entre la vitesse critique et le $\dot{V}O_{2max}$ chez des coureurs entraînés ($r = 0,77$, $p < 0,001$).

Chez les participants, la PC correspondait en moyenne à $71,9 \pm 5,0\%$ de la puissance aérobie maximale (PAM). Ceci est pratiquement identique aux résultats de Pringle et Jones (2002) qui ont trouvé que la PC correspondait à $71,0 \pm 3,0\%$ de la PAM

chez de jeunes cyclistes adultes en santé. Ces valeurs sont cohérentes avec celles de la littérature scientifique (Poole et al., 2016; Vanhatalo et al., 2011).

Toutefois, chez six des 18 participants, un des TPC a été d'une durée plus courte que ce à quoi on aurait pu s'attendre. Ces TPC ont été mis en évidence aisément car ils ont été plus courts qu'un autre TPC du même participant dont la pente était plus abrupte. Par conséquent, on peut affirmer que le participant a sous-performé et que ce TPC est invalide. Parmi les six participants qui ont eu un test sous-maximal, on en retrouve de tous les âges (18 à 43 ans) et autant chez les hommes (3) que chez les femmes (3). La puissance cardiovasculaire ne semble pas liée à ce phénomène car le participant ayant eu le plus haut $\dot{V}O_{2max}$ ($72,3 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$) a eu un TPC invalide, tout comme celui qui avait le plus faible ($33,1 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$). De plus, la séquence des TPC ne semble pas avoir affecté la durée des tests. Toutefois, pour quatre de ces six participants, le TPC dont la performance a été sous-maximale a été réalisé le premier jour, soit après le TI. Ceci semble être le facteur qui explique le mieux les sous-performances lors de ces tests. L'explication la plus plausible est donc que le premier test de la journée, le TI, a occasionné une plus grande fatigue chez les participants, ce qui a diminué la performance lors du TPC. Cette diminution de la performance peut être due à une diminution de l'efficacité mécanique du patron de marche. Il a été rapporté par Burgess et al. (2010) que la fatigue peut avoir pour effet d'augmenter la puissance métabolique requise pour effectuer un même travail mécanique. Il est donc possible qu'un repos plus long entre les tests soit nécessaire afin de favoriser une meilleure récupération, et donc des résultats plus fiables.

Le travail effectué lors du test de sauts multiples de 30 secondes (TSM30) était modérément corrélé au W' ($r = 0,530$, $p = 0,076$). Cette corrélation s'approchait du seuil de significativité sans toutefois l'atteindre. Une corrélation plus forte aurait pu être attendue étant donnée l'étude de Nebelsick-Gullett et al. (1988). Ceux-ci ont calculé une corrélation forte et significative ($r = 0,74$, $p < 0,05$) entre le W' et le travail réalisé lors d'un test de 30 secondes de type « Wingate ». Ainsi, on convient généralement que la capacité de travail anaérobie représente partiellement le W'. Toutefois, contrairement à notre étude, tous les efforts étaient exécutés sur ergocycle. On peut expliquer la non-significativité de nos résultats par la différence de mode d'exercice du TSM30 et de la marche inclinée sur tapis roulant. De plus, tel que mentionnent Sands et al. (2004), les tests de sauts pourraient être inappropriés pour les athlètes qui ne sont pas entraînés aux sauts verticaux. Bosco et al. (1983) affirment que le Wingate implique la capacité à transformer un travail métabolique en puissance mécanique alors que les tests de sauts mesurent également la composante élastique de l'appareil musculo-tendineux. L'absence de la composante élastique lors de la marche inclinée peut être à l'origine de la plus faible corrélation trouvée entre le W' et le travail effectué lors du TSM30. Par conséquent, on ne peut affirmer que le concept de W' n'est pas applicable à la marche inclinée, mais plutôt que la mesure de la capacité de travail anaérobie doit être se faire par le même mode d'exercice.

Un des avantages majeurs de ce protocole de test est qu'il permet de dresser un profil athlétique plus complet du participant. Premièrement, par la PC, il permet de connaître la puissance maximale que peut développer l'individu pour une durée d'environ

20 à 40 minutes. Deuxièmement, le W' informe sur la quantité de travail qui peut être effectuée à une intensité sévère. De plus, il quantifie en partie l'importance de la filière anaérobie. Utilisées conjointement, ces deux mesures permettent de prédire la performance maximale pour un effort d'une durée variant entre deux et environ 20 minutes. De plus, le protocole de test permet de déterminer le $\dot{V}O_{2max}$, la FC_{max} , ainsi que le RER lors d'un effort intense de courte durée.

En comparaison, le $\dot{V}O_{2max}$ représente uniquement la puissance du système cardiovasculaire, mais ne fournit aucune information sur l'endurance ou la filière anaérobie. Similairement, la PAM permet de connaître l'intensité maximale d'un effort aérobie, mais seulement dans les conditions bien précises du test qui permet de la déterminer. Ces deux données sont utiles pour caractériser un individu, mais ne permettent pas la prédiction de la performance maximale sur des durées aussi différentes que deux et 20 minutes, d'où l'avantage du concept de PC- W' .

CONCLUSION

Le caractère innovant de cette recherche tient principalement du fait que les tests à la marche sont généralement appropriés pour des populations pathologiques ou dont la condition physique est précaire. Or, le contexte légal des exigences professionnelles justifiées auquel les entreprises et organisations gouvernementales sont soumises requiert que les tests de la condition physique soient représentatifs des tâches normalement accomplies lors des activités professionnelles (Gledhill et al., 2001; Jamnik et al., 2013). Dans ce contexte, un test d'effort maximal à la marche avec charge serait plus approprié qu'un test à la course ou sur vélo stationnaire pour les pompiers, les militaires, les policiers membres d'escouades tactiques, les randonneurs en montagne, ou toute personne pour qui la course à pied n'est pas une option. Parallèlement, l'utilisation des concepts de PC et de W' permet de mettre en évidence plusieurs qualités physiologiques d'intérêt pour les professions mentionnées. Toutefois, ces concepts n'avaient jamais été appliqués à la marche inclinée avec charge, d'où l'intérêt de cette étude.

La première étape était de concevoir une méthode simple et logique pour déterminer les paramètres des TPCC. Premièrement, le questionnaire de Huet (Léger et al., 1986) a permis de sélectionner adéquatement les paramètres du TI. Ce dernier a été d'une durée cohérente avec les recommandations de la littérature scientifique, et a permis aux participants d'atteindre leur $\dot{V}O_{2max}$. Par la suite, l'algorithme pour déterminer les paramètres des TPC était d'une grande simplicité : utiliser les paramètres du dernier palier du TI pour le TPCC, soustraire 1% pour le TPCI et 2% pour le TPCL. Ces TPC ont permis

de faire ressortir les mêmes caractéristiques physiologiques que le TI. De plus, la durée de ces tests était cohérente avec les bonnes pratiques proposées par les experts en matière de PC.

Pour la majorité des participants, les trois TPC ont permis de calculer la PC et le W'. Par conséquent, à partir de ces deux valeurs, il est possible de prédire la performance maximale pour différentes durées. De plus, ces valeurs permettent d'établir le profil athlétique de l'individu. Ainsi, il est possible de déterminer si un individu a une meilleure aptitude à réaliser des épreuves d'endurance ou des efforts intenses de plus courtes durées.

Tel qu'attendu, la PC à la marche était fortement corrélée au $\dot{V}O_{2max}$, ce qui pourrait être très utile pour un professionnel de la santé ou une organisation qui souhaite évaluer un individu mais qui ne dispose pas d'un analyseur métabolique. De plus, elle s'est avérée être à un pourcentage du $\dot{V}O_{2max}$ similaire à ce que la littérature rapporte pour le cyclisme et pour la course à pied.

Finalement, il est possible de calculer la PC et le W' à partir de seulement deux TPC lorsque la différence de temps entre les deux tests est suffisamment grande. Ceci pourrait être grandement avantageux lorsque le temps disponible pour tester des participants est limité.

Limites, perspective et retombées

Le protocole de test tel qu'il a été utilisé dans cette recherche est relativement long, laborieux, et onéreux. Ainsi, dans sa forme actuelle, il serait difficilement utilisable par des organisations qui pourraient faire usage de ses résultats. De plus, il requiert quatre efforts maximaux des participants, ce qui en soit pourrait être une barrière à son acceptabilité dans le cadre d'un test de la condition physique permettant le maintien ou l'accès à un emploi physiquement exigeant. Toutefois, il serait possible de minimiser les éléments négatifs de ce protocole.

Si seulement deux TPC étaient requis, le protocole en entier pourrait être réalisé en une seule journée. Pour y arriver, il serait possible d'utiliser le questionnaire de Huet (Léger et al., 1986) pour faire une estimation préliminaire du $\dot{V}O_{2max}$, et ainsi déterminer les paramètres d'un premier TPC en utilisant la formule de Pandolf (Pandolf et al., 1977). Ainsi, le TI serait retiré du protocole. Par la suite, la sélection des paramètres du second TPC pourrait se faire en fonction de la durée du premier. Par exemple, il serait envisageable d'augmenter la pente de 2% si le premier test a été d'une durée supérieure à cinq minutes, ou réduire la pente de 2% s'il a été d'une durée inférieure à cinq minutes.

Ce protocole abrégé repose toutefois sur la capacité à évaluer correctement la condition physique du participant avant même de l'avoir testé. Par conséquent, d'autres questionnaires ou mesures biométriques simples pourraient appuyer le questionnaire de Huet (Léger et al., 1986) afin d'augmenter la précision de l'estimation initiale du $\dot{V}O_{2max}$. De plus, il est possible que l'ajout ou la soustraction de 2% à la pente du premier TPC

résulte en un second test qui soit trop long ou trop court, le plaçant ainsi à l'extérieur de la durée recommandée pour calculer la PC et W'. Ainsi, il est possible qu'un calcul plus nuancé soit requis pour s'assurer d'obtenir deux tests valides. De plus, il peut être bénéfique que le professionnel qui administre le protocole s'en remette à son expérience pour déterminer les paramètres du second test. Cette dernière avenue peut toutefois amener son lot d'inconvénients étant donnée sa nature plus subjective.

Le calcul de la PC et du W' présente donc un potentiel très intéressant pour évaluer la condition physique chez les professionnels des métiers d'urgence ou pour les athlètes pour lesquels la course à pied ou le vélo ne sont pas appropriés. Au-delà de la caractérisation de l'individu, la connaissance de la PC et du W' permet d'établir des programmes d'entraînement personnalisés. À cette fin, de nombreux outils informatiques tels que TrainingPeaks (Louisville, Colorado, États-Unis), Intervals.ICU (Londre, Angleterre), Garmin (Schaffhouse, Suisse) font usage de la PC et du W'. Ces logiciels, facilement accessibles à tous, permettent de suivre et prescrire l'entraînement de cyclistes ou de coureurs. Toutefois, il serait facile de les utiliser avec la marche inclinée avec charge comme mode d'exercice, car le cadre mathématique de la PC-W' est le même pour tous les modes d'exercice. Ainsi, on peut imaginer que le suivi longitudinal des qualités physiques des professionnels des métiers d'urgence ou de randonneurs en montagne puisse être fait par un tel logiciel. Non seulement le suivi en serait simplifié, mais l'entraînement pourrait être personnalisé à chaque individu selon son profil, sa progression, et ses objectifs.

Ce protocole de test pourrait être facilement adapté aux besoins spécifiques d'une organisation en modifiant, par exemple, la charge portée ou la température ambiante. De plus, les vêtements portés pourraient être similaires à ceux portés pendant leurs prestations. Par exemple, l'habit de protection des pompiers, en raison de son isolation, perturbe la thermorégulation, ce qui peut avoir un effet considérable sur la performance.

Ainsi, le calcul de la PC et W' pourrait servir de base sur laquelle des tests spécifiques à chaque catégorie d'emploi reposent. On peut imaginer qu'un certain niveau de PC et de W', proprement chiffrés, fassent partie d'un ensemble de mesures pour accéder ou maintenir un emploi physiquement exigeant en demeurant dans le cadre légal des exigences professionnelles justifiées. Ainsi, en ayant un portrait clair et juste des qualités physiques et physiologiques, les organisations et entreprises seront en mesure de prendre une décision éclairée quant aux meilleures mesures à prendre pour favoriser la sécurité et l'intégrité physique des professionnels et de ce qu'ils protègent.

RÉFÉRENCES

- Abe, D., Yanagawa, K., & Niihata, S. (2004). Effects of load carriage, load position, and walking speed on energy cost of walking. *Applied Ergonomics*, 35(4), 329-335.
- Alexander, R.M. (1984). Walking and running. *American Scientist*, 72, 348-354.
- Astorino, T. A., Rietschel, J. C., Tam, P. A., Taylor, K., Johnson, S. M., Freedman, T. P., & Sakarya, C. E. (2004). Reinvestigation of optimal duration of VO₂ max testing. *Journal of Exercise Physiology Online*, 7(6).
- Bastien, G. J., Willems, P. A., Schepens, B., & Heglund, N. C. (2005). Effect of load and speed on the energetic cost of human walking. *European Journal of Applied Physiology*, 94(1), 76-83.
- Bosco, C., P. Luhtanen, & P.V. Komi. (1983). A simple method for measurement of mechanical power in jumping. *European Journal of Applied Physiology*, 50, 273-282.
- Brickley, G., Doust, J., & Williams, C. (2002). Physiological responses during exercise to exhaustion at critical power. *European Journal of Applied Physiology*, 88(1), 146-151.
- Bruce, R., Kusumi, F., & Hosmer, D. (1973). Maximal oxygen intake and nomographic assessment of functional aerobic impairment in cardiovascular disease. *American Heart Journal*, 85(4), 546-562.
- Burdett, R. G., Skrinar, G. S., & Simon, S. R. (1983). Comparison of mechanical work and metabolic energy consumption during normal gait. *Journal of Orthopaedic Research*, 1(1), 63-72.
- Burr, J. F., Bredin, S. S., Faktor, M. D., & Warburton, D. E. (2011). The 6-minute walk test as a predictor of objectively measured aerobic fitness in healthy working-aged adults. *The Physician and Sports Medicine*, 39(2), 133-139.
- Caputo, F., & Denadai, B. S. (2008). The highest intensity and the shortest duration permitting attainment of maximal oxygen uptake during cycling: effects of different methods and aerobic fitness level. *European Journal of Applied Physiology*, 103(1), 47-57.

- Carlton, S. D., Carbone, P. D., Stierli, M., & Orr, R. M. (2014). The impact of occupational load carriage on the mobility of the tactical police officer. *Journal of Australian Strength and Conditioning*, 21(1), 32-37.
- Cavagna, G.A. (1969). Travail mécanique dans la marche et la course. *The Journal of Physiology*, 61(1), 4-42.
- Cavagna, G. A., & Kaneko, M. (1977). Mechanical work and efficiency in level walking and running. *The Journal of Physiology*, 268(2), 467-481.
- Chidnok, W., Fulford, J., Bailey, S. J., DiMenna, F. J., Skiba, P. F., Vanhatalo, A., & Jones, A. M. (2013). Muscle metabolic determinants of exercise tolerance following exhaustion: relationship to the “critical power”. *Journal of Applied Physiology*, 115(2), 243-250.
- Dekerle, J., Sidney, M., Hespel, J. M., & Pelayo, P. (2002). Validity and reliability of critical speed, critical stroke rate, and anaerobic capacity in relation to front crawl swimming performances. *International Journal of Sports Medicine*, 23(02), 93-98.
- Ebbeling, C. B., Ward, A., Puleo, E. M., Widrick, J., & Rippe, J. M. (1991). Development of a single-stage submaximal treadmill walking test. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 23(8), 966-973.
- Enright, P. L. (2003). The six-minute walk test. *Respiratory Care*, 48(8), 783-785.
- Freud, S. (2015). *Civilization and its discontents*. Broadview Press.
- Galán-Rioja, M. Á., Gonzalez-Mohino, F., Poole, D. C., & González-Ravé, J. M. (2020). Relative proximity of critical power and metabolic/ventilatory thresholds: systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine*, 50, 1771-1783.
- Galbraith, A., Hopker, J., Lelliott, S., Diddams, L., & Passfield, L. (2014). A single-visit field test of critical speed. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 9(6), 931-935.
- Gendron, P., Freiburger, E., Laurencelle, L., Trudeau, F., & Lajoie, C. (2015). Greater physical fitness is associated with better air ventilation efficiency in firefighters. *Applied Ergonomics*, 47, 229-235.
- Gendron, P., Trudeau, F., Laurencelle, L., Goulet, É. D., Houle, J., & Lajoie, C. (2019). Shortened recovery period between firefighting work bouts increases cardiac response disproportionately with metabolic rate. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 61(5), e217-e225.

- Gledhill, N., Jamnik, V., & Shaw, J. (2001). Establishing a bona fide occupational requirement for physically demanding occupations. In *Proceedings of the National Forum on Bona Fide Occupational Requirements* (pp. 9-13).
- Grassi, B., & Quaresima, V. (2016). Near-infrared spectroscopy and skeletal muscle oxidative function in vivo in health and disease: a review from an exercise physiology perspective. *Journal of Biomedical Optics*, *21*(9), 091313.
- Hale, T. (2008). History of developments in sport and exercise physiology: AV Hill, maximal oxygen uptake, and oxygen debt. *Journal of Sports Sciences*, *26*(4), 365-400.
- Hill, D. W., Poole, D. C., & Smith, J. C. (2002). The relationship between power and the time to achieve VO₂ max. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *34*(4), 709-714.
- Hreljac, A. (1993). Preferred and energetically optimal gait transition speeds in human locomotion. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *25*(10), 1158-1162.
- Hreljac, A. (1995). Determinants of the gait transition speed during human locomotion: kinematic factors. *Journal of Biomechanics*, *28*(6), 669-677.
- Horiuchi, M., Handa, Y., & Fukuoka, Y. (2018). Impact of ambient temperature on energy cost and economical speed during level walking in healthy young males. *Biology Open*, *7*(7).
- Jamnik, V., Gumienak, R., & Gledhill, N. (2013). Developing legally defensible physiological employment standards for prominent physically demanding public safety occupations: a Canadian perspective. *European Journal of Applied Physiology*, *113*(10), 2447-2457.
- Karsten, B., Hopker, J., Jobson, S. A., Baker, J., Petrigna, L., Klose, A., & Beedie, C. (2017). Comparison of inter-trial recovery times for the determination of critical power and W' in cycling. *Journal of Sports Sciences*, *35*(14), 1420-1425.
- Kennedy, M. D., & Bell, G. J. (2000). A comparison of critical velocity estimates to actual velocities in predicting simulated rowing performance. *Canadian Journal of Applied Physiology*, *25*(4), 223-235.
- Klimek, A. T., & Klimek, A. (2007). The weighted walking test as an alternative method of assessing aerobic power. *Journal of Sports Sciences*, *25*(2), 143-148.
- Knapik, J. J., Harman, E. A., Steelman, R. A., & Graham, B. S. (2012). A systematic review of the effects of physical training on load carriage performance. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, *26*(2), 585-597.

- Kolbe, T., Dennis, S. C., Selley, E., Noakes, T. D., & Lambert, M. I. (1995). The relationship between critical power and running performance. *Journal of Sports Sciences*, 13(3), 265-269.
- Kravitz, L., & McCormick, J. (2013). The metabolic cost of slow graded treadmill walking with a weighted vest in untrained females. Retrieved from *acefitness.org*.
- Kuo, A. D., Donelan, J. M., & Ruina, A. (2005). Energetic consequences of walking like an inverted pendulum: step-to-step transitions. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 33(2), 88-97.
- Lange, G. W., Hintermeister, R. A., Schlegel, T., Dillman, C. J., & Steadman, J. R. (1996). Electromyographic and kinematic analysis of graded treadmill walking and the implications for knee rehabilitation. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 23(5), 294-301.
- Lee, I. M., & Buchner, D. M. (2008). The importance of walking to public health. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 40(7), S512-S518.
- Léger, L., Huet, B., & Cloutier, J. (1986). Prediction of maximal power from a health and lifestyle questionnaire. *Canadian Journal of Applied Sport Science*, 11, 25.
- Léger, L. A., & Lambert, J. (1982). A maximal multistage 20-m shuttle run test to predict VO₂max. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 49(1), 1-12.
- Leroux, A., Fung, J., & Barbeau, H. (2002). Postural adaptation to walking on inclined surfaces: I. Normal strategies. *Gait & Posture*, 15(1), 64-74.
- Mann, R. A., & Hagy, J. (1980). Biomechanics of walking, running, and sprinting. *The American Journal of Sports Medicine*, 8(5), 345-350.
- Mian, O. S., Thom, J. M., Ardigò, L. P., Narici, M. V., & Minetti, A. E. (2006). Metabolic cost, mechanical work, and efficiency during walking in young and older men. *Acta Physiologica*, 186(2), 127-139.
- Midgley, A. W., McNaughton, L. R., Polman, R., & Marchant, D. (2007). Criteria for determination of maximal oxygen uptake. *Sports medicine*, 37(12), 1019-1028.
- Minetti, A. E., Moia, C., Roi, G. S., Susta, D., & Ferretti, G. (2002). Energy cost of walking and running at extreme uphill and downhill slopes. *Journal of Applied Physiology*.

- Monod, H., & Scherrer, J. (1965). The work capacity of a synergic muscular group. *Ergonomics*, 8(3), 329-338.
- Morton, R. H., & Billat, V. (2013). Modelling decremental ramps using 2-and 3-parameter “critical power” models. *Journal of Sports Sciences*, 31(7), 731-735.
- Nebelsick-Gullett, L. J., Housh, T. J., Johnson, G. O., & Bauge, S. M. (1988). A comparison between methods of measuring anaerobic work capacity. *Ergonomics*, 31(10), 1413-1419.
- Pandolf, K. B., Givoni, B., & Goldman, R. F. (1977). Predicting energy expenditure with loads while standing or walking very slowly. *Journal of Applied Physiology*, 43(4), 577-581.
- Pringle, J. S., & Jones, A. M. (2002). Maximal lactate steady state, critical power and EMG during cycling. *European Journal of Applied Physiology*, 88(3), 214-226.
- Peeters, P., & Mets, T. (1996). The 6-minute walk as an appropriate exercise test in elderly patients with chronic heart failure. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, 51(4), M147-M151.
- Poole, D. C., Burnley, M., Vanhatalo, A., Rossiter, H. B., & Jones, A. M. (2016). Critical power: an important fatigue threshold in exercise physiology. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 48(11), 2320.
- Rønnestad, B. R., Hansen, J., Stensløyken, L., Joyner, M. J., & Lundby, C. (2019). Case studies in physiology: temporal changes in determinants of aerobic performance in individual going from alpine skier to world junior champion time trial cyclist. *Journal of Applied Physiology*, 127(2), 306-311.
- Robinson, J., Roberts, A., Irving, S., & Orr, R. (2018). Aerobic Fitness is of Greater Importance than Strength and Power in the Load Carriage Performance of Specialist Police. *International Journal of Exercise Science*, 11(4), 987-998.
- Sands, W. A., McNeal, J. R., Ochi, M. T., Urbanek, T. L., Jemni, M., & Stone, M. H. (2004). Comparison of the Wingate and Bosco anaerobic tests. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 18(4), 810-815.
- Schultz, A. H. (1950). The specializations of man and his place among the catarrhine primates. In *Cold Spring Harbor symposia on quantitative biology* (Vol. 15, pp. 37-53). Cold Spring Harbor Laboratory Press.

- Simpson, L. P., & Kordi, M. (2017). Comparison of critical power and W' derived from 2 or 3 maximal tests. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 12(6), 825-830.
- Société canadienne de physiologie de l'exercice. (2013). *SPAP-SCPE La santé par l'activité physique*, (Première édition), Ottawa (Ontario).
- Société canadienne de physiologie de l'exercice. (2017). *Questionnaire Menez une vie plus active*, Repéré en ligne à https://www.csep.ca/CMFiles/publications/CSEP-0462-PATH_Readiness_Form-FRE_Updates_r3.pdf.
- Swearingen, J. T., Weiss, L. W., Smith, W. A., Stephenson, M. D., & Schilling, B. K. (2018). Potential utility of a loaded treadmill protocol for tactical athletes. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 32(3), 610-616.
- Taylor, N. A., Lewis, M. C., Notley, S. R., & Peoples, G. E. (2012). A fractionation of the physiological burden of the personal protective equipment worn by firefighters. *European journal of applied physiology*, 112(8), 2913-2921.
- Thomas, M., Pohl, M. B., Shapiro, R., Keeler, J., & Abel, M. G. (2018). Effect of load carriage on tactical performance in special weapons and tactics operators. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 32(2), 554-564.
- Valli, G., Cogo, A., Passino, C., Bonardi, D., Morici, G., Fasano, V., ... & Palange, P. (2011). Exercise intolerance at high altitude (5050 m): critical power and W' . *Respiratory Physiology & Neurobiology*, 177(3), 333-341.
- Vanhatalo, A., Doust, J. H., & Burnley, M. (2007). Determination of critical power using a 3-min all-out cycling test. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 39(3), 548-555.
- Vanhatalo, A., Jones, A. M., & Burnley, M. (2011). Application of critical power in sport. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 6(1), 128-136.
- Walker, R. E., Swain, D. P., Ringleb, S. I., & Colberg, S. R. (2015). Effect of added mass on treadmill performance and pulmonary function. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 29(4), 882-888.
- Weller, A. S., Millard, C. E., Greenhaff, P. L., & MacDonald, I. A. (1998). The influence of cold stress and a 36-h fast on the physiological responses to prolonged intermittent walking in man. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 77(3), 217-223.
- Wu, T., & Zhao, Y. (2021). Associations between functional fitness and walking speed in older adults. *Geriatric Nursing*, 42(2), 540-543.

Yoon, B. K., Kravitz, L., & Robergs, R. (2007). VO₂max, protocol duration, and the VO₂ plateau. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 39(7), 1186-1192.

ANNEXE A

Questionnaire Menez une vie plus active

L'activité physique améliore la santé physique et mentale. Même en petite quantité, l'activité physique fait du bien, et plus on en fait, mieux c'est.

Pour presque tout le monde, les bienfaits de l'activité physique surpassent largement les risques. Toutefois, pour certaines personnes, il est recommandé d'obtenir les conseils d'un professionnel de l'exercice qualifié (PEQ – détient un diplôme d'études postsecondaires en science de l'exercice et une certification avancée dans ce domaine – consultez scpe.ca/certifications) ou d'un professionnel de la santé. Ce questionnaire s'adresse aux personnes de tous âges et a pour objectif de les aider à cheminer vers un mode de vie plus actif.

- Je réponds à ce questionnaire pour moi-même.
- Je réponds à ce questionnaire pour mon enfant/une personne à charge en tant que parent/tuteur.

OUI	NON	PRÉPAREZ-VOUS À MENER UNE VIE PLUS ACTIVE
●	●	Les questions suivantes permettront de confirmer que vous pouvez pratiquer une activité physique en toute sécurité. Veuillez répondre OUI ou NON à chacune des questions <u>avant</u> de mener une vie plus active. Si vous ne savez pas exactement quoi répondre, choisissez OUI .
●	●	1 Avez-vous vécu N'IMPORTE LAQUELLE des situations suivantes (A à F) au cours des six derniers mois?
●	●	A Diagnostic ou traitement relativement à une maladie du cœur ou à un AVC, ou douleur/malaise/pression au niveau de la poitrine en pratiquant vos activités de la vie quotidienne ou une activité physique?
●	●	B Diagnostic ou traitement relativement à une hypertension artérielle ou à une tension artérielle au repos de 160/90 mm de Hg ou plus?
●	●	C Vertiges ou étourdissements durant l'activité physique?
●	●	D Essoufflement au repos?
●	●	E Perte de conscience/évanouissement pour quelque raison que ce soit?
●	●	F Commotion?
●	●	2 Présentez-vous actuellement de la douleur ou une enflure à n'importe quelle partie de votre corps (p. ex. blessure, poussée aiguë d'arthrite ou douleur au dos) qui nuit à votre capacité de mener une vie active?
●	●	3 Un professionnel de la santé vous a-t-il recommandé d'éviter ou de modifier certains types d'activité physique?
●	●	4 Avez-vous tout autre problème médical ou physique (p. ex. diabète, cancer, ostéoporose, asthme, lésion médullaire) qui pourrait nuire à votre capacité de mener une vie active?
●	●	<p>..... ➤ NON à toutes les questions : allez à la page 2 – ÉVALUEZ VOTRE NIVEAU D'ACTIVITÉ PHYSIQUE ACTUEL</p>
●	●	<p>OUI à au moins une question : allez au document de référence – CONSEILS SI VOUS AVEZ RÉPONDU OUI À AU MOINS UNE QUESTION</p>

ÉVALUEZ VOTRE NIVEAU D'ACTIVITÉ PHYSIQUE ACTUEL

Répondez aux questions suivantes pour évaluer votre niveau d'activité physique actuel.

- 1 Au cours d'une semaine typique, combien de jours pratiquez-vous une activité physique aérobie d'intensité moyenne à élevée (p. ex. marche rapide, cyclisme ou jogging)? JOURS/SEMAINE
 - 2 Les journées où vous faites de l'activité physique aérobie d'intensité au moins moyenne (par exemple marche rapide), pendant combien de minutes pratiquez-vous cette activité? MINUTES/JOUR
- Si vous êtes un adulte, multipliez le nombre moyen de jours par semaine par le nombre moyen de minutes par jour. MINUTES/SEMAINE

Les Directives canadiennes en matière de mouvement sur 24 heures recommandent la pratique d'au moins 150 minutes par semaine d'activité physique d'intensité moyenne à élevée chez les adultes. Pour les enfants et les jeunes, on recommande au moins 60 minutes par jour. Il est également recommandé de pratiquer des activités pour renforcer les muscles et les os au moins deux fois par semaine pour les adultes, et trois fois par semaine pour les enfants et les jeunes (voir scpe.ca/directives).



CONSEILS GÉNÉRAUX POUR MENER UNE VIE PLUS ACTIVE

Augmentez graduellement votre niveau d'activité physique afin que votre expérience demeure positive. Intégrez des activités physiques qui vous plaisent à votre journée (p. ex. marcher avec un ami ou une amie, se rendre au travail ou à l'école à vélo) et réduisez vos comportements sédentaires (p. ex. périodes prolongées passées en position assise).

Si vous voulez pratiquer une **activité physique d'intensité élevée** (p. ex. une activité physique à une intensité à laquelle il est difficile de maintenir une conversation) et que vous n'atteignez pas les recommandations minimales en matière d'activité physique mentionnées ci-dessus, consultez un professionnel de l'exercice qualifié (PEQ) avant de vous y mettre. Cela permettra de confirmer que votre activité physique est sécuritaire et convient à votre situation.

L'activité physique est aussi une partie importante d'une grossesse en santé.



Attendez avant de mener une vie plus active si vous ne vous sentez pas bien en raison d'une maladie temporaire.

DÉCLARATION

Au meilleur de mes connaissances, tous les renseignements que j'ai fournis dans ce questionnaire sont exacts. Si des changements surviennent à mon état de santé, je remplirai le questionnaire à nouveau.

J'ai répondu **NON** à toutes les questions de la page 1

J'ai répondu **OUI** à au moins une question de la page 1

Signez et datez la déclaration ci-dessous

Cochez la case ci-dessous qui s'applique à vous :

- J'ai consulté un professionnel de la santé ou un professionnel de l'exercice qualifié (PEQ) qui m'a recommandé de mener une vie plus active.
- Je suis à l'aise à l'idée de mener une vie plus active sans consulter un professionnel de la santé ou un PEQ.

Nom (en caractères d'imprimerie) + nom du parent/tuteur, le cas échéant Signature (ou signature du parent/tuteur, le cas échéant) Date de naissance

Date

Courriel (optionnel)

Téléphone (optionnel)

Avec de la planification et du soutien, vous pouvez profiter des bienfaits d'une vie plus active. Un PEQ peut vous aider.

- Cochez cette case si vous souhaitez consulter un PEQ afin de mener une vie plus active. (Vos réponses à ce questionnaire aideront le PEQ à apprendre à vous connaître et à comprendre vos besoins.)

ANNEXE B

Questionnaire pour prédire la puissance aérobie maximale

Questionnaire pour prédire la puissance aérobie maximale

B. Huet, 1984

Département d'éducation physique

Université de Montréal

Note : encercler votre choix et reportez le chiffre correspondant dans l'espace prévu dans la marge de droite, puis faire le total pour obtenir «X».

1 Est-ce que votre emploi demande un effort physique ?			
Choix	Réponse	Valeur	Chiffre
A	Intense (ex : bucheron, déménageur, etc.)	2	
B	Moyennement Intense (ex : construction, messenger, etc.)	1	
C	Peu intense (ex : vendeur, etc.)	0.5	
D	Sédentaire (ex : travail de bureau)	0	

2 Quels genres d'activités physiques avez-vous l'habitude de pratiquer ?			
Choix	Réponse	Valeur	Chiffre
A	Qui fait suer et augmenter le rythme respiratoire (ex : jogging, ski de fond, etc.) de façon régulière.	3	
B	Qui fait augmenter le rythme respiratoire (ex : badminton, raquetball, etc.) de façon intermittente.	2	
C	Qui fait légèrement augmenter le rythme respiratoire (marche, balle-molle, etc.)	1	
D	De précision (ex : bowling, tir-à-l'arc, etc.)	0.5	

3 Au cours de l'année qui s'est écoulée, combien de fois/mois avez-vous pratiqué votre activité physique préférée ?			
Choix	Réponse	Valeur	Chiffre
A	0 à 4 fois par mois	0	
B	5 à 8 fois par mois	1	
C	9 à 12 fois par mois	2	
D	13 fois et plus par mois	3	

4 Généralement, quelle est la durée moyenne de chacune de vos séances d'activité physique (en minutes) ?			
Choix	Réponse	Valeur	Chiffre
A	Moins de 15 minutes	0	
B	16 à 30 minutes	1	
C	31 à 45 minutes	2.5	
D	46 à 60 minutes	3.2	
E	60 minutes et plus	3.5	

5 Habituellement, comment percevez-vous votre effort pendant vos séances d'activité physique ? Note : si vous avez répondu «D» à la question #2, indiquez 0 dans la marge			
Choix	Réponse	Valeur	Chiffre
A	Très facile	1	
B	Facile	1.5	
C	Moyennement difficile	2.5	
D	Difficile	3	
E	Très difficile	3.5	

6 Entre l'âge de 10 à 16 ans, aviez-vous l'habitude de pratiquer des activités physiques ?			
Choix	Réponse	Valeur	Chiffre
A	Régulièrement (plus de 4 fois par semaine)	2	
B	Peu (moins de 3 fois par semaine)	1	
C	Très peu (1 fois par semaine ou moins)	0	

7 Combien de cigarette fumez-vous par jour ?			
Choix	Réponse	Valeur	Chiffre
A	0-2	0	
B	3-15	-1	
C	16 et plus	-2	

8 À combien estimez-vous votre surplus de poids ?			
Choix	Réponse	Valeur	Chiffre
A	0 à 2 lbs (0 à 1 kg)	1	
B	3 à 6 lbs (1.5 à 3 kg)	0	
C	7 à 10 lbs (3.5 à 5 kg)	-1	
D	11 lbs et plus (plus de 5 kg)	-2	

Questions 1 à 8 TOTAL	X1	
------------------------------	-----------	--

9	Avez-vous déjà pratiqué en compétition une activité physique ou sportive ?		
Choix	Réponse	Valeur	Chiffre
A	Non	0	
B	Oui, lors de compétition régionales (ex : course populaire)	3	
C	Oui, lors de compétition provinciale (ex : Jeux du Québec)	4	
D	Oui, lors de compétition nationale et internationale	5	

10	Souffrez-vous d'une ou des pathologies suivantes tout en ayant l'autorisation de votre médecin de pratiquer une activité physique régulière et intense ? Diabète-hypertension-problèmes cardiaques et respiratoires-asthme-obésité-arthrite		
Choix	Réponse	Valeur	Chiffre
A	Oui	-5	
B	Non	0	

Questions 9 et 10 TOTAL	X2	
--------------------------------	-----------	--

Équations pour prédire la PAM (Y, ml/kg min)		
Âge	Hommes	Femmes
16-19	$Y = 41.25 + 1.269 X_1 + X_2$	$Y = 31.97 + 0.792 X_1 + X_2$
20-29	$Y = 34.40 + 1.536 X_1 + X_2$	$Y = 31.37 + 0.730 X_1 + X_2$
30-39	$Y = 34.12 + 1.080 X_1 + X_2$	$Y = 25.04 + 0.916 X_1 + X_2$
40-49	$Y = 31.23 + 0.812 X_1 + X_2$	$Y = 19.44 + 1.103 X_1 + X_2$
50-59	$Y = 27.88 + 0.836 X_1 + X_2$	$Y = 19.81 + 0.714 X_1 + X_2$
60-69	$Y = 24.41 + 0.568 X_1 + X_2$	$Y = 18.68 + 0.511 X_1 + X_2$

Transcrit sur Word par Chantal Daigle (Kinésiologie, Udm) Août 2014



CERTIFICAT D'ÉTHIQUE DE LA RECHERCHE AVEC DES ÊTRES HUMAINS

En vertu du mandat qui lui a été confié par l'Université, le Comité d'éthique de la recherche avec des êtres humains a analysé et approuvé pour certification éthique le protocole de recherche suivant :

Titre : Évaluation de la puissance critique métabolique à la marche sur plan incliné avec charge chez des participants en bonne condition physique

Chercheur(s) : Philippe Lacroix
Département des sciences de l'activité physique

Organisme(s) : Aucun financement

N° DU CERTIFICAT : CER-21-277-07.09

PÉRIODE DE VALIDITÉ : Du 05 juillet 2021 au 05 juillet 2022

En acceptant le certificat éthique, le chercheur s'engage à :

- Aviser le CER par écrit des changements apportés à son protocole de recherche avant leur entrée en vigueur;
- Procéder au renouvellement annuel du certificat tant et aussi longtemps que la recherche ne sera pas terminée;
- Aviser par écrit le CER de l'abandon ou de l'interruption prématurée de la recherche;
- Faire parvenir par écrit au CER un rapport final dans le mois suivant la fin de la recherche.

Me Richard LeBlanc
Président du comité

Fanny Longpré
Secrétaire du comité