UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ESTIMATION DU MÉTABOLISME DE TRAVAIL À PARTIR DE MESURES DE FRÉQUENCE CARDIAQUE EFFECTUÉES LORS DU TRAVAIL FORESTIER: RÉEXAMEN D'ASPECTS MÉTHODOLOGIQUES DU POINT DE VUE DU PRATICIEN

PHILIPPE-ANTOINE DUBÉ

DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET DE GÉNIE INDUSTRIEL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLÔME DE PHILOSOPHIAE DOCTOR

(GÉNIE INDUSTRIEL)

DÉCEMBRE 2014

© Philippe-Antoine Dubé, 2014.

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse intitulée:

ESTIMATION DU MÉTABOLISME DE TRAVAIL À PARTIR DE MESURES DE FRÉQUENCE CARDIAQUE EFFECTUÉES LORS DU TRAVAIL FORESTIER: RÉEXAMEN D'ASPECTS MÉTHODOLOGIQUES DU POINT DE VUE DU PRATICIEN

présentée par : DUBÉ Philippe-Antoine

en vue de l'obtention du diplôme de : Philosophiae Doctor

a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de :

M. BOURGAULT Mario, Ph. D., président

M. IMBEAU Daniel, Ph. D., membre et directeur de recherche

M. CHINNIAH Yuvin, Ph. D., membre

M. GOUW Gerard J., Ph. D., membre

DÉDICACE

À mes parents, votre amour et indéfectible confiance

m'ont porté et me porteront toujours

vers les plus hauts sommets

REMERCIEMENTS

Il n’y a pas de mots pour exprimer la gratitude et la reconnaissance pour toute l’aide, le support et l’amitié sincère que m’a apportés Daniel Imbeau, mon directeur de recherche. Il a non seulement été un mentor, un directeur, un professeur et un boss, mais encore plus un ami pour qui j’ai beaucoup d’affection. Je tiens également à remercier Renée Leblanc de m’avoir permis d’emprunter son mari, autant de fois que nécessaire, même la veille de Noël pour terminer un rapport de recherche. À chaque fois, son sourire et sa joie n’ont pas manqué d’égayer nos rencontres.

J’exprime également toute ma gratitude à Denise Dubeau de qui j’ai tout appris du monde forestier et sans qui rien de cela n’aurait eu été possible. Denise est pour moi plus qu’une collègue, mais aussi une amie sur qui on peut toujours compter. J’espère continuer notre relation même après l’achèvement de ce travail.

Je dédie ce travail à mes parents, particulièrement à ma mère, Maria Helena, qui m’a supporté tout au long de mon cheminement autant psychologiquement que financièrement. À mon père, Benoît, sa confiance inébranlable en moi m’a permis de garder le cap lors des jours sombres, qui parfois ont été nombreux.

Une place particulière dans mon cœur va à Maiko Sato, ma femme, qui, avec patience, vit avec les hauts et les nombreux bas du quotidien d’un candidat au doctorat et qui a su me ramener sur terre dans mes nombreux voyages interstellaires. Son constant support tout au long de ce périple a été indispensable à l'achèvement de ce projet. Une autre place va à ma belle-sœur, Maria Osikowicz, pour son support et son aide à la correction de l’anglais.

Je tiens à souligner l’implication et la collaboration d’Isabelle Auger pour ses nombreux et judicieux conseils, et ses réponses rapides et concrètes quant aux analyses statistiques. Je tiens aussi à souligner l’implication de Steve Lemay, Laurent Giraud, Adam Page, Carlos Campo, Lisa Breton et Ahmet Kolus, aux nombreuses collectes de données et avec qui j’ai eu beaucoup de plaisir sur le terrain.

Je remercie Luc LeBel pour sa contribution il y a plusieurs années à la mise en place de l’environnement de recherche ayant rendu possible les études plus récentes sur lesquelles cette thèse est basée.

Je tiens également à remercier les membres du jury : M. Mario Bourgault, M. Yuvin Chinniah, M. Gerard J. Gouw et M. Carl-Éric Aubin pour avoir accepté cordialement de réviser cette thèse.

Les projets sur lesquels cette thèse est basée ont été financés conjointement par le Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, le Fonds de recherche du Québec - Nature et technologies (FRQNT), le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada, par l'entremise de la Chaire de recherche du Canada en ergonomie, et l' Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail.

RÉSUMÉ

Le métabolisme de travail (WM) et la capacité-respiratoire (MAC) sont des paramètres incontournables dans l'évaluation ergonomique du travail. La fréquence cardiaque est souvent proposée pour estimer le métabolisme de travail et la capacité cardio-respiratoire à partir de la relation linéaire entre la fréquence cardiaque (HR) et la consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$), un indicateur du métabolisme de travail, établie individuellement par un test à l'effort sous-maximal, habituellement administré en laboratoire. Une élévation de la température corporelle due à un travail physique soutenu ou en présence d'une contrainte thermique (chaleur ambiante, isolement vestimentaire) peut amener une élévation substantielle de la fréquence cardiaque, et donc se traduire par une surestimation de la $\dot{V}O_2$. Cette élévation de la fréquence cardiaque d'origine thermique devrait être prise en compte si la fréquence cardiaque est utilisée pour estimer le métabolisme de travail. Vogt et al. (1970, 1973) ont proposé une méthode simple permettant d'estimer l'élévation d'origine thermique pour corriger la fréquence cardiaque mesurée durant le travail. Or, bien que l'effet de la chaleur sur la fréquence cardiaque est connu depuis longtemps, l'erreur d'estimation du métabolisme de travail qu'elle entraîne est très mal documentée. Également, aucune étude n'a comparé l'estimation du métabolisme de travail à partir de la fréquence cardiaque avec une mesure de la $\dot{V}O_2$ durant le travail, et ce dans des conditions de travail réelles.

La première étude visait à quantifier l'erreur d'estimation de la $\dot{V}O_2$ associée à l'utilisation de la fréquence cardiaque de travail brute (celle mesurée durant le travail) et de la fréquence cardiaque corrigée de sa composante thermique. La fréquence cardiaque a été mesurée en continu lors d'une journée entière de travail chez 41 travailleurs forestiers (débroussailleurs et reboiseurs). Des pauses assises de 10 minutes ont été imposées sur les lieux de travail afin d'estimer l'élévation de la fréquence cardiaque d'origine thermique conformément à la méthode proposée par Vogt et al. (1970, 1973). La $\dot{V}O_2$ a été mesurée à l'aide d'un appareil portatif de mesure des gaz expirés lors d'un step-test effectué le matin sur les lieux de travail; pendant une période de travail; et pendant une pause de 10 minutes suivant la période de travail. La $\dot{V}O_2$ estimée à partir de la fréquence cardiaque brute et de la fréquence cardiaque corrigée a été comparées à la $\dot{V}O_2$ mesurée durant cette période de travail et de repos. Des composantes thermiques (ou extrapulsations thermiques - EPCT) variables ont été observées. Les résultats montrent qu'en ne corrigeant pas la fréquence cardiaque de la composante thermique lorsqu'elle est présente, une surestimation substantielle de

la $\dot{V}O_2$ est observée, tandis qu'en corrigeant la fréquence cardiaque l'estimation de la $\dot{V}O_2$ n'est pas statistiquement différente de la mesure. Les résultats ont également montré une forte corrélation entre l'erreur de prédiction et la composante thermique; plus elle est élevée, plus l'erreur d'estimation est importante. La méthode de Vogt et al. permet donc d'estimer de façon précise la composante d'origine thermique de la fréquence cardiaque, et conséquemment la précision de l'estimation du métabolisme de travail à partir de cette mesure.

La deuxième étude aborde quatre aspects méthodologiques auxquels fait face le praticien en ce qui a trait à l'établissement de la relation HR-$\dot{V}O_2$ par le biais d'un test à l'effort sous-maximal standardisé. Cette relation peut avoir deux utilités. D'une part, elle peut servir à estimer le métabolisme de travail à partir d'une mesure de la fréquence cardiaque et d'autre part, elle peut servir à estimer la capacité cardio-respiratoire du travailleur (indicateur de condition physique) par extrapolation à la valeur maximale de sa fréquence cardiaque. Plus précisément, cette étude tentait de répondre aux questions : 1) Est-il préférable de mesurer la $\dot{V}O_2$ durant le test afin d'améliorer l'estimation du métabolisme de travail plutôt que d'utiliser les valeurs prédéterminées pour chacun des paliers d'effort du test choisi? 2) Lors de l'administration du test, le travailleur doit-il impérativement porter des vêtements légers de sport tel que suggéré pour maintenir la précision du test ou peut-il porter ses vêtements de travail? 3) Si une élévation de la fréquence cardiaque d'origine thermique apparaît durant la pause de récupération consécutive au test à l'effort, faut-il en tenir compte dans l'établissement de la relation HR-$\dot{V}O_2$ du travailleur en corrigeant les valeurs de fréquence cardiaque durant le test? 4) Sachant que plusieurs équations de prédiction de la fréquence cardiaque maximale sont proposées dans la littérature, l'utilisation de l'une ou l'autre des deux les plus fréquemment citées engendre-t-elle une différence dans l'estimation de la capacité cardio-respiratoire du sujet? Un total de 93 step-tests de Meyer et Flenghi (1995) ont été administrés en laboratoire à 26 sujets sains ainsi qu'aux sites de travail de 41 travailleurs forestiers expérimentés afin d'établir la relation Fc-$\dot{V}O_2$ de chacun de ces sujets. La capacité cardio-respiratoire estimée par le step-test a été comparée à la capacité cardio-respiratoire mesurée en laboratoire au moyen d'un test maximal sur tapis roulant. Les effets de deux équations de prédiction de la fréquence cardiaque maximale (220-age et 207-0.7×age) et de deux ensembles vestimentaires offrant des isolations thermiques différentes ont été testés. De même, le métabolisme de travail estimé à partir de différentes relations basées sur la fréquence cardiaque mesurée lors du travail forestier a été comparé à la valeur mesurée. Les résultats de l'étude montrent que la capacité cardio-respiratoire

et le métabolisme de travail peuvent être estimés de manière précise sans nécessiter de correction aux fréquences cardiaques du test sous-maximal et sans nécessiter de mesurer la $\dot{V}O_2$ durant le test (erreur de 1% en moyenne avec des limites d'accords 95% de ±25%). Une nouvelle équation de prédiction de la $\dot{V}O_2$ aux paliers du test a été développée dans cette étude. L'isolement vestimentaire et le choix de l'équation de prédiction de la fréquence cardiaque maximale du sujet n'ont pas eu d'effet sur l'estimation de la capacité cardio-respiratoire.

La troisième étude visait à comparer deux méthodes d'estimation de l'élévation d'origine thermique de la fréquence cardiaque quant à la précision qu'elles procurent dans l'estimation du métabolisme de travail à partir de la fréquence cardiaque de travail. La température corporelle (intestinale), la fréquence cardiaque et la $\dot{V}O_2$ on été mesurées simultanément durant le travail forestier. Les méthodes de Vogt et al. (1970, 1973) et de Kampmann, Kalkowski et Piekarski (2001) ont été utilisées pour estimer l'élévation d'origine thermique de la fréquence cardiaque sur une journée complète de travail chez 30 travailleurs forestiers. La fréquence cardiaque de travail a ensuite été corrigée de cette élévation et utilisée pour estimer le métabolisme de travail pour 15 des 30 sujets. Les deux méthodes permettent d'en arriver à des estimations semblables en ce qui a trait à la composante thermique de la fréquence cardiaque. Dans l'ensemble, la méthode de Vogt et al. a permis une estimation du métabolisme de travail légèrement plus précise.

Les résultats de cette recherche offrent des guides méthodologique et pratique que le praticien peut mettre à profit lors de l'estimation du métabolisme de travail par le biais de la mesure de la fréquence cardiaque.

ABSTRACT

Work metabolism (WM) and maximal aerobic capacity (MAC) are fundamentals in the evaluation of the physical aspect of work in occupational ergonomics. Heart rate (HR) is often used to estimate WM and MAC from an individual HR to oxygen uptake ($\dot{V}O_2$) relationship establish on a submaximal test conducted in laboratory. An increase in core temperature due to prolonged workload or climatic load could lead to a substantial increase in HR, and therefore, an overestimation of WM. This increase in HR from heat stress should be taking into account if HR is to be used to estimate WM. Vogt et al. (1970, 1973) proposed a simple method to assess the heat stress contribution to HR (HR thermal component, ΔHR_T) in field setting. Yet, despite that the effect of heat stress on HR has long been recognized, the prediction bias associated with elevated HR from heat stress is unknown. Also, no study have compared WM prediction to actual WM when the thermal component is removed from raw HR.

The first study aims to characterize the $\dot{V}O_2$ estimation error associated with heart rate (HR) measured during work and with HR corrected (thermal component removed) according to Vogt et al. (1970, 1973). Workday HR was monitored in 41 forest workers while performing brushcutting or tree planting work. 10-min seated rest periods were imposed during the workday to estimate the HR thermal component (ΔHR_T) according to Vogt et al. (1970, 1973). $\dot{V}O_2$ was measured using a portable gas analyzer during a morning submaximal step-test conducted at the work site, during a work session over the course of the day (range: 9 to 74 min), and during the following 10-min rest period taken at the worksite. The $\dot{V}O_2$ estimated, from measured HR and from corrected HR, were then compared to $\dot{V}O_2$ measured during work and rest. Varied levels of HR thermal component were observed ($\Delta HR_T avg$ range: 0 to 38 bpm). Using raw HR significantly overestimate measured work $\dot{V}O_2$ on average by 30% (range: 1% to 64%). 74% of $\dot{V}O_2$ prediction error variance was explained by the HR thermal component. $\dot{V}O_2$ estimated from corrected HR was not statistically different from measured $\dot{V}O_2$. Work $\dot{V}O_2$ can be estimated accurately in the presence of thermal stress using Vogt et al.'s method and can be implemented easily, with inexpensive instruments by the practitioner.

The second study addresses four methodological questions faced by practitioners regarding the administration of a submaximal step-test in work settings and the accuracy of using the step-test heart rate to workload relationship to predict maximum aerobic capacity (MAC) and work

metabolism (WM). Specifically, this study aims to answer: 1) what is the loss of accuracy in MAC and WM when using an equation predicting step-test $\dot{V}O_2$ values vs $\dot{V}O_2$ measurements during the step-test? 2) is the HR-$\dot{V}O_2$ relationship affected by wearing normal work clothes (vs light clothes) during a step-test? 3) if so, should the consequent HR increase be removed from the step-test data to improve MAC and WM assessments? 4) does the HR max prediction equation used affects the MAC estimate? This study make use of datasets collected in two experiments: one in laboratory to test MAC estimates and one during actual work (field study to test WM estimates using the Meyer and Flenghi (1995) submaximal step-test). Individual subject heart rate (HR) to workload relationships were determined through 93 submaximal step-tests administered to 26 healthy subjects attending physical activities in a University training center (Laboratory study) and 41 experienced forest workers (Field study). Maximum aerobic capacity (MAC) predicted with each subject's relationship was compared to measured MAC from a maximal treadmill test (Laboratory study) to test the effect of two age-predicted maximum HR equations (220-age and 207-0.7×age) and two clothing insulation levels (0.4 and 0.91 clo) during the step-test. Work metabolism (WM) estimated from forest work HR was compared against concurrent work $\dot{V}O_2$ measurements while taking into account the HR thermal component. Results show that MAC and WM can be accurately predicted (1% mean prediction bias with ±25% 95%LoA) from work HR measurements and simple regression models developed in this study. Clothing insulation had no impact on predicted MAC nor age-predicted maximum HR equations.

The third study compares work metabolism estimation accuracy between two methods to assess the HR thermal component. Concurrent body core temperature, heart rate (HR), and energy expenditure were obtained during forest work. Methods previously described by Vogt et al. (1970; 1973) and Kampmann et al. (2001) were used to assess HR thermal component associated with body heat accumulation over a complete work day in 30 forest workers. The HR thermal component was deducted from the work HR data to obtain a thermoneutral HR profile from which work metabolism was estimated for n=15 workers. The two methods showed comparable average Thermal Cardiac Reactivity estimations of 26 and 31 bpm/˚C. Overall the method described by Vogt et al. (1970, 1973) provided a slightly better work metabolism estimation with a bias ± 95%LoA of 0.5 ± 4.4 mlO_2/kg/min or 2.2% ± 21.6%. It was shown to be also simpler to implement, and it appears as a natural choice for the practitioner.

The results obtained in this research project provided concrete answers to some methodological issues faced by the practitioner in the determination of work metabolism by means of heart rate measurements. These results also provide guidelines for the practitioner who is interested in work metabolism assessment in field settings.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE III

REMERCIEMENTS IV

RÉSUMÉ VI

ABSTRACT IX

TABLE DES MATIÈRES XII

LISTE DES TABLEAUX XVI

LISTE DES FIGURES XVIII

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS XX

LISTE DES ANNEXES XXII

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION 1

1.1 Évaluation du métabolisme de travail par la mesure de la fréquence cardiaque 2

1.1.1 Facteurs influençant la fréquence cardiaque de travail 3

1.1.2 Méthode d'estimation de la dérive cardiovasculaire en situation de travail. 6

1.2 Problématique 7

1.3 Objectifs 8

1.4 Organisation de la thèse 9

CHAPITRE 2 : SURVOL DES COLLECTES DE DONNÉES 10

2.1 Description des variables d'intérêt et appareillages utilisés 12

2.2 Collectes de données 16

2.2.1 Étude laboratoire sur validation du step-test de Meyer et Flenghi (1995) à l'aide d'un test maximal sur tapis roulant 16

2.2.2 Les effets d'un entraînement physique pré-saison sur le travail et la sécurité des travailleurs forestiers. 17

2.2.3 Performance organisationnelle et productivité des reboiseurs lors de la mise en terre de plants forestiers. 18

2.2.4 Étude préliminaire de l'effet d'une rémunération horaire sur la productivité du débroussailleur en fin de carrière. 19

2.2.5 Évaluation de la naturalité, du rendement et de la productivité des débroussialleurs pour différentes modalités d'éclaircie précommerciale. 21

CHAPTER 3 : ARTICLE 1 : REMOVING THE THERMAL COMPONENT FROM HEART RATE PROVIDES AN ACCURATE $\boldsymbol{VO2}$ ESTIMATION IN FOREST WORK 23

3.1 Abstract 24

3.2 Introduction 25

3.3 Methods 27

3.3.1 Subjects 27

3.3.2 Procedure 27

3.3.3 Data processing 31

3.3.4 Statistical Analysis 32

3.4 Results 33

3.4.1 Subject characteristics and ambient conditions 33

3.4.2 Physiological response 34

3.4.3 $\boldsymbol{VO2}$ estimation error 38

3.5 Discussion 41

3.6 Conclusion 46

3.7 Acknowledgements 46

CHAPTER 4 : ARTICLE 2 : PREDICTION OF WORK METABOLISM FROM HEART RATE MEASUREMENTS IN FOREST WORK: SOME PRACTICAL METHODOLOGICAL ISSUES 47

4.1 Abstract 48

4.2 Introduction 49

4.3 Methods 51

4.3.1 Laboratory study 51

4.3.2 Field study 54

4.3.3 Data preparation and processing 55

4.3.4 Statistical analyses 58

4.4 Results 60

4.4.1 Step-test data analyses 60

4.4.2 Maximum aerobic capacity (MAC) prediction 65

4.4.3 Work $\boldsymbol{VO2}$ (WM) estimation 68

4.5 Discussion 70

4.6 Conclusion 76

4.7 Acknowledgements 76

CHAPTER 5 : ARTICLE 3 : IMPROVING WORK METABOLISM ESTIMATION FROM WORK HEART RATE: COMPARISON OF TWO METHODS TO ASSESS THERMAL CARDIOVASCULAR DRIFT 77

5.1 Abstract 78

5.2 Introduction 79

5.3 Methods 80

5.3.1 Subjects 80

5.3.2 Variables and apparatus 80

5.3.3 Procedure 81

5.3.4 Data preparation and processing 82

5.3.5 Data processing 84

5.3.6 Statistical analysis 85

5.4 Results 86
5.4.1 Thermal HR component 86
5.4.2 Thermal Cardiac Reactivity 89
5.4.3 Work metabolism prediction 92
5.5 Discussion 93
5.6 Conclusion 96
5.7 Acknowledgements 96
CHAPITRE 6 : DISCUSSION GÉNÉRALE 97
6.1 Procédure générale revisitée 102
6.2 Limites et recherches futures 108
CONCLUSION 110
BIBLIOGRAPHIE 111
ANNEXE 121

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1: Synthèse des échantillons de sujets suivis dans les collectes de données et sous-échantillons retenues pour les articles. 20

Table 3.1: Subject characteristics (n=41). 33

Table 3.2: Ambient conditions and clothing insulation observed during the step-test and the work period (n=41). 34

Table 3.3: Physiological responses during the morning step-test and work period. 36

Table 4.1: HR-$VO2$ relationships built from step-test stage-HR (raw and ΔHRT corrected) and stage-$VO2$ (measured and estimated). 58

Table 4.2: Description of subjects characteristics and ambient conditions during the step-test per subject group. 61

Table 4.3: Mean difference±95%LoA of HR, corrected HR and $VO2$ at each stage of the Laboratory study step-tests for a) clothing, b) test period. 64

Table 4.4: Fitted model using Laboratory study $VO2$ data in ml/kg/min (n=465 datapoints = 93 step-tests × 5 stages). 65

Table 4.5: ANOVA results on MAC prediction bias (predicted – treadmill measured). 66

Table 4.6: Mean prediction bias ± standard deviation of differences between measured and estimated MAC, and bias ± 95%LoA for HR-$VO2$ relationships (R1 to R6) using HRmax=220-age (n=52). 67

Table 4.7: MAC results 68

Table 4.8: Mean WM estimates and prediction bias±95%LoA between $VO2$ estimates from using R1 to R6 and $VO2$ measured during the work bout in the field study (n=41). Results are presented using corrected forest work HR for R1 to R6, as well as with raw forest work HR for R1 69

Table 5.1: Subject characteristic, clothing insulation and ambient conditions during workday 81

Table 5.2: Core temperature measurement, ΔHRT estimations using the two methods, and LoA analysis results average over the entire workday. 86

Table 5.3: Core temperature measurement, ΔHRT estimations using the two methods, and LoA analysis results for the 101 usable work and rest phases. 88

Table 5.4: Regression on the variation of ΔHRT against Tcore for all 202 work and rest periods (n=101 work periods and n=101 rest periods) for the two methods. 92

Table 5.5: Mean physiological responses during the work and rest periods.....93

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1: Example de signal cardiac bruité (gris) et nettoyé (noir) d'un sujet lors d'une journée de mesure.....22

Figure 3-1: Schematics of the experimental procedure. Top chart displays measured (raw) heart rate (HR) (black), HR thermal component or HR_T (grey), and corrected HR (blue) profiles for a complete workday and the morning step-test. Middle chart displays a close-up view of the $VO2$ measurement period. Bottom chart displays measured $VO2$ (red) and the resulting predicted $VO2$ values using raw HR (black) and corrected HR (blue). 29

Figure 3-2: Physiological responses from three subjects with different ΔHRT profiles during work in the forest. On the left: raw HR (dark), corrected HR (blue), HR_T (dashed) and rest HR (dotted). On the right: measured $VO2$ (red) and predicted $VO2$ with raw HR (black) and with corrected HR (blue).....37

Figure 3-3: Mean bias and 95% LoA between $MeasVO2$ for the work and the rest phases, and $Raw_{HR}VO2$ (top) and $Corr_{HR}VO2$ (bottom). 39

Figure 3-4: Relationship between the biases of $VO2$ predicted with *Raw*HR (top) and with *Corr*HR (bottom), and $\Delta HRTavg$ for work data (circle) and the rest data (triangle).....40

Figure 4-1: Example of step-tests results for a subject in the laboratory study. Upper part: HR profiles for the two step-tests (raw HR in black solid line, corrected HR in grey solid line and resting HR in dashed line): with *work clothing* on the left and *light clothing* on the right. Lower left: HR-$VO2$ data points for the two MF step-tests and from the treadmill test. 57

Figure 4-2: Mean and standard deviation of HR and $VO2$ measured during the step-tests for each stage in each subject group. White marker represents light clothing and black and grey markers represent work clothing. 63

Figure 5-1: Example of application of the two methods to assess the HR thermal component over a workday. Upper chart displays HR (grey), measured core temperature (red), HR thermal component per Vogt et al.'s (black) and Kampmann et al.'s (blue) methods, respectively. Bottom charts display a close-up of Vogt et al.'s method during work phase P3 (left), and thermal cardiac reactivity function per Kampmann et al.'s method (right). 84

Figure 5-2: Line chart of all Kampmann's thermal cardiac reactivity functions (blue lines), average slope (dashed) and average TCR transition point (round marker). Background: Scatter plot of all minute-by-minute ΔHRT from Vogt et al. method against Tcore (grey dot) and resulting average TCR function (dotted).....89

Figure 5-3: Variation in ΔHRT against variation in Tcore during the work and rest periods for all n=101 phases for the two methods (top: Vogt et al., bottom: Kampmann et al.). Blue line represents the regression computed on all 101 phase datapoints with unilateral 1.645 × SEE confidence interval (blue dotted). Black dotted lines represent the average thermal cardiac reactivity reported by ISO 8996:2004 (33 bpm/°C) and Meyer et al. (2001) (30 bpm/°C)…91

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

bpm	Battements cardiaque par minute
DRF	Direction de la recherche forestière
ECG	Électrocardiogramme
EPCT	Extra pulsations cardiaques thermiques, aussi appelées ΔHR_T (bpm)
HR	Fréquence cardiaque (bpm), de Heart Rate
HRc	Fréquence cardiaque corrigée des EPCT (bpm)
HR_0	Fréquence cardiaque de repos (bpm)
$HR_{0_{step}}$	Fréquence cardiaque de repos du palier repos (palier 1) du step-test de Meyer et Flenghi (1995) (bpm)
ΔHR_ε	Composante résiduelle dans la fréquence cardique liée au rythme de la respiration, au rythme circadien, etc.
ΔHR_N	Élévation de la fréquence cardiaque due a des facteurs psychologiques (travail mentale, stress, etc.)
ΔHR_M	Élévation de la fréquence cardiaque liée au métabolisme de travail (bpm)
ΔHR_S	Élévation de la fréquence cardiaque liée a la production d'efforts musculaires statiques (bpm)
ΔHR_T	Élévation de la fréquence cardiaque liée à la contrainte thermique subie par le sujet (bpm)
IRSST	Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail
ml/kg/min	Militre de O_2 consommé par kilogramme de poids corporel par minute

MAC	Capacité maximale aérobique, de Maximal Aerobic Capacity, aussi appelée $\dot{V}O_2max$ (ml/kg/min)
MET	Équivalent métabolique correspondant au métabolisme basal
MFFP	Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs
PEPTF	Programme d'entraînement physique pour les travailleurs forestiers
P_a	Pression atmosphérique (kPa)
T_a	Température ambiante (sèche) de l'air (° Celcius)
T_c	Température corporelle (° Celcius)
T_h	Température humide psychrométrique (° Celcius)
T_{hn}	Température humide naturelle (° Celcius)
T_g	Température du thermomètre globe (° Celcius)
RH	Humidité relative (%)
V_a	Vitesse de l'air en mètre par seconde (m/s)
$\dot{V}O_2$	Volume d'oxygène consommée (ml/kg/min)
$\dot{V}O_2max$	Capacité cardiorespiratoire, aussi appelée MAC (ml/kg/min)
WBGT	Wet Bulb and Globe Temperature

LISTE DES ANNEXES

Annexe A – Exemple du questionnaire pour l'utilisation de la capsule thermique 121

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

Le métabolisme de travail (WM) ainsi que la capacité cardiorespiratoire ($\dot{V}O_2max$) ou capacité maximale aérobique (MAC), sont deux paramètres essentiels à l'évaluation ergonomique du travail physique. Le métabolisme de travail, exprimé généralement en Joule/s, en kcal/min ou en Watt, informe sur la charge physique imposée par le travail ou sur la dépense énergétique qu'il entraîne. Le métabolisme de travail est une donnée d'entrée nécessaire à la conception d'une organisation temporelle du travail physique (c.-à-d., régime d'alternance travail-récupération) visant à éviter la fatigue excessive laquelle est souvent à l'origine d'une baisse de productivité et de problèmes de santé chez les travailleurs (Chengalur, Rodgers et Bernard, 2004; Rohmert, 1973). Le métabolisme de travail est également l'une des données d'entrée nécessaire à l'utilisation des différents indices et modèles d'évaluation du confort et de la contrainte thermique chaude ou froide (ex. TLV, TWL, IREQ, WBGT, PHS, PMV-PPD) (ACGIH, 2013; Brake et Bates, 2002; ISO 11079:2008; ISO 7730:2006; ISO 7933:2004; ISO 7243:1989). Ces indices et modèles sont utilisés tant pour l'évaluation que pour la conception d'équipements et d'environnements de travail confortables ou minimisant les risques liés aux contraintes thermiques (ex., travail à la chaleur ou au froid).

La détermination du métabolisme de travail intéresse autant le professionnel en tant qu'utilisateur des modèles et indices décrits ci-dessus (ex., l'ergonome, l'hygiéniste industriel, le conseiller en santé et sécurité du travail ou l'ingénieur industriel) que le chercheur désirant améliorer ces modèles et indices existants ou en développer de nouveaux. Dans cette thèse, on utilisera le terme praticien pour désigner autant le professionnel praticien que le chercheur. Ainsi, le praticien est intéressé à une évaluation juste et fiable du WM puisque la sous-estimation du WM mènera à une situation de travail non sécuritaire tandis qu'une valeur surestimée engendrera une situation de travail improductive.

La consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$), généralement exprimé en litre d'O_2 par minute ou en ml/kg/min, est un excellent indicateur du métabolisme de travail puisque pour un travail musculaire, la transformation de l'énergie consommée en énergie mécanique est largement due au processus aérobique (Rodahl, 2003). La consommation d'oxygène peut-être mesurée avec précision au moyen d'un appareil de mesure des gaz expirés, dont des modèles portatifs sont maintenant largement disponibles. Il s'agit de l'indice de référence le plus souvent utilisé en physiologie du sport et du travail pour caractériser la charge physique de travail (Åstrand et Rodahl,

1986; Rodahl, 2003; McArdle, Katch et Katch, 2006). Des équations de conversion permettent de passer d'une unité de mesure à une autre aisément.

La capacité cardio-respiratoire (MAC ou $\dot{V}O_2max$) d'une personne, un indicateur de sa capacité à réaliser un travail physique, est généralement exprimée en litre d'O_2 par minute ou en ml/kg/min comme pour le métabolisme de travail. La MAC est généralement estimée au moyen d'un test à l'effort sous-maximal (ex., test sur banc ou step-test ou vélo stationnaire) puisqu'il est habituellement risqué de pousser à sa capacité maximale une personne dont on ne connaît pas la santé cardiaque. C'est particulièrement le cas pour les travailleurs avançant en âge. La MAC estimée pour un sujet est typiquement comparée à des valeurs de référence publiées dans la littérature afin de situer sa condition physique par rapport à celle du même groupe d'âge de la population (ex., Campbell et Campbell, 1988; Chengalur *et al.*, 2004). Le ratio du métabolisme de travail à la MAC (%MAC ou %$\dot{V}O_2$max) décrit l'effort relatif déployé par une personne pour réaliser un travail physique. Cet effort relatif est utilisé comme donnée d'entrée à différents modèles de détermination de l'organisation temporelle du travail (Chengalur *et al.*, 2004; Rodahl, 2003).

1.1 Évaluation du métabolisme de travail par la mesure de la fréquence cardiaque

Malgré les avancés technologiques des appareils de mesure des gaz expirés au cours des dernières années, ces instruments demeurent coûteux (à l'achat, à l'usage et pour l'entretien), difficiles à employer sur le terrain (harnais, lignes d'échantillonnage, enregistreur et port d'un masque encombrant) et nécessitent une certaine expertise pour leur utilisation et surtout pour leur calibration (Rodahl, 2003). De plus, le port de l'équipement est intrusif de sorte qu'il peut nuire à l'exécution du travail et gêner la vision du travailleur, ce qui peut poser un risque d'accident/incident en milieu industriel. Enfin le port du masque est souvent jugé inconfortable par les travailleurs de sorte que la mesure de la $\dot{V}O_2$ est habituellement limitée à de courtes périodes lorsque ces mesures sont réalisées dans des conditions de travail réelles (Nielsen et Meyer, 1987). En comparaison, la fréquence cardiaque peut être mesurée facilement en continu sur de longues périodes au moyen d'un équipement peu coûteux (cardiofréquencemètre), ne gênant pas le travail parce qu'il est très compact, facile d'utilisation et d'entretien (aucune calibration nécessaire). La

fréquence cardiaque est étroitement liée à la consommation d'oxygène. En effet, l'oxygène est transporté aux muscles via le flux sanguin produit par le cœur de sorte que ses battements augmentent selon l'accroissement de l'activité musculaire afin de fournir adéquatement en oxygène et en éléments nutritifs le muscle qui travaille, et le débarrasser des déchets produits par la contraction musculaire. La relation entre la fréquence cardiaque et la consommation d'oxygène (relation HR-$\dot{V}O_2$) est linéaire sur la majeure partie de la plage de variation de la fréquence cardiaque, c'est-à-dire, pour un grand nombre d'activités sportives et de travail (ISO 8996:2004; McArdle *et al.*, 2006). La pente de cette relation varie grandement d'une personne à l'autre selon la capacité cardiorespiratoire (Louhevaara et Kilbom, 2005). Il est donc nécessaire de calibrer la relation HR-$\dot{V}O_2$ à l'aide d'un test à l'effort progressif pour chaque sujet. Normalement on recommande que ce test soit effectué en laboratoire alors que le sujet porte une tenue vestimentaire légère (short, t-shirt et souliers de course). Selon ISO 8996 (2004) l'utilisation de la relation HR-$\dot{V}O_2$ d'un travailleur établie lors d'un test à l'effort, permettrait d'estimer le métabolisme de travail à partir d'une mesure de la fréquence cardiaque effectuée durant le travail avec une précision de ±10% comparativement à une erreur correspondante inférieure à 5% lorsque la $\dot{V}O_2$ est mesurée durant le travail au moyen d'un appareil de mesure des gaz expirés.

1.1.1 Facteurs influençant la fréquence cardiaque de travail

La fréquence cardiaque est un excellent témoin global de l'astreinte physique, c'est-à-dire qu'elle décrit fidèlement la réaction physiologique du corps humain soumis à un ensemble de contraintes (ex., physiques et environnementaux). Elle reflète non seulement le métabolisme associé aux contractions musculaires, mais également les réactions de l'organisme à différents facteurs de stress, dont l'ambiance thermique, le stress psychologique, le travail mental, la fatigue, le travail musculaire statique, le rythme circadien, etc. Ces facteurs s'ils sont présents durant le travail, vont faire augmenter la fréquence cardiaque et donc introduire une surestimation de la $\dot{V}O_2$ s'ils n'étaient pas présents lors de la calibration de la relation HR-$\dot{V}O_2$ et qu'ils ne sont pas pris en compte correctement.

La norme internationale ISO 8996 (2004) propose une relation intéressante qui permet une synthèse des différents facteurs de stress influençant la fréquence cardiaque. Celle-ci à tout instant peut-être définie comme la somme des composantes:

$$\mathrm{HR} = HR_0 + \Delta HR_M + \Delta HR_S + \Delta HR_T + \Delta HR_N + \Delta HR_\varepsilon \qquad (1)$$

Où HR_0 est la fréquence cardiaque de repos en posture assise dans des conditions thermiques neutres (c.-à-d., des conditions d'ambiance thermique où le corps humain ne gagne ni ne perd de chaleur), ΔHR_M est l'élévation liée au métabolisme de travail (travail musculaire dynamique) dans des conditions thermiques neutres, ΔHR_S est l'élévation liée au travail musculaire statique, ΔHR_T est l'élévation liée à la contrainte thermique subie par le sujet (c.-à-d. élévation due à l'accroissement de la température corporelle)(aussi appelée extrapulsations cardiaques thermiques ou EPCT), ΔHR_N est l'élévation due a des facteurs psychologiques (charge mentale, stress, etc.), et ΔHR_ε est une composante résiduelle, normalement négligeable, liée au rythme de la respiration, au rythme circadien, à la déshydratation, etc.

Ces facteurs ne sont pas indépendants. Par exemple, la composante liée aux facteurs psychologiques et la composante résiduelle disparaissent lorsque le métabolisme de travail ΔHR_M est modéré à élevé et donc peuvent être négligées dans ces conditions. La composante due aux efforts statiques (ex., maintien d'une posture fortement penchée, ou maintien d'une charge à bout de bras) peut influencer grandement la mesure de la fréquence cardiaque. Ainsi, pour un effort comparable, l'élévation de la fréquence cardiaque associée à un effort musculaire statique est beaucoup plus élevée que la composante liée à un effort musculaire dynamique. La raison en est qu'en règle générale, les groupes musculaires mis en jeu sont plus petits dans les efforts statiques et que le processus anaérobique s'active plus rapidement. Un effort statique par contre ne peut pas être maintenu longtemps de sorte que son impact est limité dans le temps. Certains auteurs ont montré que dès qu'une composante musculaire dynamique soutenue est présente, la relation HR-$\dot{V}O_2$ n'est pas significativement modifiée (Bot et Hollander, 2000), ce qui signifie que pour une majorité des activités de travail, la composante musculaire statique peut être négligée.

La composante liée à l'astreinte thermique peut difficilement être négligée. L'effet de la contrainte thermique (ambiance chaude) sur la mesure de la fréquence cardiaque est reconnu depuis longtemps (Brouha, Maxfield, Smith et Stopps, 1963). En effet, le corps tente par tous les moyens de maintenir une température corporelle stable (autour de 37 °C; Parsons, 2014). S'il y a augmentation de la température corporelle au-dessus d'un certain seuil, lequel peut varier beaucoup d'une personne à l'autre, le corps humain enclenche des mécanismes de thermorégulation afin d'abaisser la température à sa valeur normale. Deux mécanismes sont mis en jeu : la sudation et la

vasodilatation périphérique. La sudation facilite le refroidissement du corps par l'évaporation de la sueur à la surface de la peau, tandis que la vasodilatation périphérique produit une augmentation du flux sanguin cutané visant à transporter la chaleur du noyau du corps vers la périphérie. L'augmentation du flux sanguin résulte d'une augmentation de la fréquence cardiaque (Parsons, 2014; Rowell, 1986). L'activité musculaire produisant elle-même de la chaleur, lorsqu'un travail physique d'intensité modérée à élevé est soutenu, durant une période dépassant les 10 minutes, une augmentation graduelle de la température corporelle peut être mesurée de même qu'une augmentation graduelle de la fréquence cardiaque. C'est le phénomène de la dérive cardiovasculaire, influencée par les conditions d'ambiance thermique, du métabolisme de travail et de l'état d'hydratation du sujet (déshydratation) (Coyle, 1998; Coyle et González-Alonso, 2001). L'isolement vestimentaire, en gênant les échanges de chaleur avec l'environnement, aura une influence sur la dérive cardiovasculaire. Des études en laboratoire ont montré qu'une élévation de la température corporelle de 1°C, seuil limite sécuritaire pour l'astreinte thermique, est associé à une élévation de la fréquence cardiaque de 33 bpm en moyenne (ISO 9886:2004). Meyer, Martinet, Payot, Didry et Horwat (2001) citent des études rapportant des valeurs correspondantes allant de 22.7 bpm à 36 bpm. Une telle élévation de la fréquence cardiaque est importante. Par exemple, pour un sujet de 40 ans ayant une fréquence cardiaque de repos de 75 bpm, une élévation de la fréquence cardiaque de 30 bpm correspond à une augmentation d'utilisation de sa capacité cardiaque de 29%. Ainsi, pour cet individu le seul fait de réaliser le travail physique à la chaleur coûte 29% plus cher à son cœur que si le même travail était réalisé en conditions thermiques plus fraîches (c.-à-d. son cœur travaille 29% plus fort simplement à cause de la chaleur). Malgré que l'influence de l'ambiance thermique chaude sur la fréquence cardiaque est connue depuis longtemps (Brouha *et al.*, 1963), peu d'études ont caractérisé l'erreur d'estimation de la $\dot{V}O_2$ basée sur la fréquence cardiaque mesurée durant un travail réalisé à la chaleur. Mentionnons également qu'aucune étude n'a vérifié la précision de cette estimation ($\dot{V}O_2$) par rapport à une mesure de la $\dot{V}O_2$ durant le travail.

1.1.2 Méthode d'estimation de la dérive cardiovasculaire en situation de travail.

Deux méthodes, à notre connaissance, permettent d'estimer la composante thermique de la fréquence cardiaque : la méthode de Vogt et al. (1970, 1973) et la méthode de Kampmann et al. (2001). La méthode de Vogt et al. utilise l'analyse du profil de la fréquence cardiaque pour estimer les extrapulsations thermiques (EPCT) durant le travail. La méthode se base sur le temps plus lent que prend le corps pour perdre la chaleur accumulée que le temps de récupération du système cardiovasculaire à un effort musculaire. Suite à un effort musculaire, la fréquence cardiaque diminue rapidement pour se stabiliser à sa valeur de repos. Le temps de récupération est en moyenne de 4 minutes (Vogt et al., 1973). Lorsqu'il y a présence d'EPCT, la fréquence cardiaque reste élevée à la 4e minute après l'arrêt du travail et diminue lentement jusqu'à ce que la chaleur accumulée durant le travail ait été évacuée du corps.

La méthode de Kampmann et al. se base plutôt sur l'enregistrement en continu de la température corporelle et de la fréquence cardiaque tout au long d'une journée complète de travail pour estimer les EPCT. À des valeurs élevées de température corporelle, la fréquence cardiaque reste élevée même durant les pauses. Ainsi, dans le graphique de la fréquence cardiaque en fonction de la température corporelle on peut distinguer la valeur de fréquence cardiaque la plus basse pour chaque valeur de température corporelle. À l'aide de ce graphique, on peut dresser une relation de transfert entre la température corporelle et l'élévation de la fréquence cardiaque de repos (voir figure 5-1). Cette relation est ensuite utilisée avec les valeurs de températures corporelles pour estimer les EPCT pour la journée entière de travail. La pente de cette relation est ce qu'on appelle la réactivité cardiaque thermique, c'est-à-dire l'élévation de la fréquence cardiaque d'origine thermique pour une élévation de 1 °C de température corporelle (ISO 9886:2004).

Tout comme la méthode de Vogt et al., la méthode de Kampmann et al. n'a pas fait l'objet d'études de validation sur le terrain par des chercheurs autres que les auteurs de ces méthodes. Mentionnons également que ces deux méthodes n'ont jamais été comparées dans une même étude.

1.2 Problématique

La mesure de la fréquence cardiaque est une approche fort attrayante pour le praticien intéressé à évaluer l'astreinte physique globale parce qu'elle constitue un indicateur facile à mettre en œuvre, bien validé et relativement facile à estimer (Chengalur et al. 2004). Par exemple, la valeur mesurée peut être directement comparée à des limites publiées permettant d'établir si le travail est sécuritaire ou non, et ce qu'il y ait ou pas une charge thermique (Brouha, 1967). Par contre, le praticien intéressé à utiliser différents modèles d'organisation temporelle du travail ou de contrainte thermique chaude a besoin de connaître le métabolisme de travail ou la dépense énergétique associée à ce travail. La fréquence cardiaque offre une approche générale indirecte attrayante pour l'évaluer, cependant la précision de cette approche est mal documentée dans la littérature. C'est d'autant plus vrai que différents aspects méthodologiques pouvant entraîner des variantes dans l'application de l'approche ne sont pas précisés. Par exemple, pour un maximum de précision dans l'estimation du métabolisme de travail par le biais de la relation HR-$\dot{V}O_2$ et d'une mesure de la fréquence cardiaque durant le travail, on peut facilement penser qu'il est préférable de mesurer la $\dot{V}O_2$ durant le test à l'effort sous-maximal. Compte tenu de l'effort de mise en œuvre significatif nécessaire pour administrer ce genre de test et sachant qu'on conseille habituellement qu'il soit réalisé dans un environnement intérieur protégé des intempéries, préférablement là où l'ambiance thermique est contrôlée, il est logique de penser que l'utilisation d'un appareil de mesure des gaz expirés vaut l'effort additionnel pour obtenir une précision accrue. On peut aussi se demander si l'exigence de faire passer le test en ambiance thermique contrôlé est nécessaire pour assurer une estimation précise. Or, la littérature n'offre aucun support au praticien sur ces aspects pourtant possiblement déterminants sur la précision et le coût de l'approche, des critères importants pour le praticien. Un autre exemple concerne la question de l'habillement porté par le travailleur durant le test à l'effort: le sujet peut-il porter ses vêtements de travail normaux sans que la précision de l'approche soit irrémédiablement affectée ou doit-on lui imposer une tenue de jogging légère tel que recommandé dans la littérature sur les sports? Pour le praticien, demander à un travailleur de se changer de tenue pour passer un test à l'effort pour ensuite se revêtir pour aller travailler, et ce, habituellement en début de quart de travail, ne constitue pas un facteur facilitant la collaboration du travailleur, en plus d'allonger encore un peu plus la durée du test.

1.3 Objectifs

Le premier objectif de cette thèse était de caractériser l'erreur d'estimation du métabolisme de travail à partir de la fréquence cardiaque, et ce, pour un travail physique impliquant ou non une contrainte thermique chaude. Le facteur d'intérêt ici est de tenir compte de l'élévation de la fréquence cardiaque liée à la contrainte thermique, étant donné qu'en toute logique elle s'avère être une source potentiellement importante d'erreur.

Le second objectif de la thèse visait à quantifier l'erreur d'estimation du métabolisme de travail et de la capacité cardiorespiratoire associée à la manipulation de différents aspects méthodologiques et pratiques reliés à l'établissement de la relation HR-$\dot{V}O_2$ par un test à l'effort sous maximal. Ces aspects méthodologiques ont trait à l'habillement porté par le travailleur pendant le test, l'intérêt de mesurer ou non la $\dot{V}O_2$ durant le test, l'effet d'utiliser l'une ou l'autre de deux équations populaires de prédiction de la fréquence cardiaque maximale, et l'intérêt ou non de tenir compte de la composante thermique de la fréquence cardiaque durant le test à l'effort (c.-à-d., corriger ou non la relation HR-$\dot{V}O_2$ de l'effet thermique).

Un troisième objectif était de comparer les deux approches publiées à ce jour pour estimer l'élévation de la fréquence cardiaque d'origine thermique quant à l'estimation du métabolisme de travail.

Au final, les retombées éventuelles de cette thèse permettront de mieux concevoir le travail dans le but d'empêcher la fatigue excessive qui accroît le risque pour la santé et la sécurité des travailleurs tout en nuisant à la productivité. En caractérisant mieux l'erreur associée à l'estimation du WM par la mesure de la fréquence cardiaque ainsi que les sources de cette erreur qui sont liées aux aspects méthodologiques, on offre au praticien la possibilité d'un meilleur contrôle sur le processus d'application de la méthode et donc une meilleure confiance dans ce qu'il fait. On peut penser qu'un praticien plus en confiance sera plus enclin à utiliser la méthode, ce qui devrait contribuer à améliorer les situations de travail.

1.4 Organisation de la thèse

Le chapitre 1 introduisait le lecteur au sujet en exposant l'état des connaissances, la problématique ainsi que les objectifs poursuivis par cette thèse. Le chapitre 2 décrit les différentes études desquelles les données utilisées pour la thèse ont été tirées. Les mesures faites dans ces études, les appareillages utilisés et les difficultés rencontrées sont résumés de façon à dresser un portrait global de l'effort de recherche à la base de cette thèse. Les chapitres 3 à 5 présentent successivement les trois articles soumis pour publication. Enfin, les résultats sont brièvement discutés, les limites de cette recherche exposées, et des avenues de recherche futures proposées.

CHAPITRE 2 : SURVOL DES COLLECTES DE DONNÉES

Depuis 2001, la Chaire de recherche du Canada en ergonomie en partenariat avec la direction de la Direction de la recherche forestière (DRF) du Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec (MFFP) collaborent à des projets portant sur différentes facettes de la productivité et de la charge physique de travail des travailleurs forestiers. Au fil de ces projets, 9 collectes de données ont été réalisées sur ces travailleurs, particulièrement ceux affectés aux traitements mécaniques de la régénération (débroussailleurs de régénération et d'éclaircie précommerciale) et au reboisement (reboiseurs).

L'expérience acquise de 2001 à 2007 a permis de développer une expertise en ce qui a trait à la mesure de la charge physique de travail des travailleurs forestiers. Une procédure générale a ainsi été développée et affinée, pour se concrétiser lors d'une étude de faisabilité en 2008. La procédure est détaillée à la section 3.3.2. Également, les travaux réalisés de 2001 à 2007 ont fait ressortir des questions sur la mesure de la charge physique de travail auxquelles la littérature n'apportait pas de réponses. Ces questions sont donc devenues des questions de recherche en attente d'une thèse.La présente thèse est basée sur les 4 dernières collectes de données «terrains» effectuées de 2008 à 2013. Il est important de clarifier le contexte particulier dans lequel se sont déroulées ces collectes de données. L'industrie forestière, particulièrement en ce qui a trait aux travaux sylvicoles liés à l'aménagement forestier, fait face à une pénurie de main-d'œuvre et une relève qui tarde à suivre, et ce, depuis le début des années 2000. La charge de travail lourde, les conditions de travail difficiles et la rémunération des travailleurs ont été pointées du doigt comme facteurs ayant joué un rôle important dans cette pénurie (Langlois, 2004). Afin d'y pallier, au tournant des années 2000 le MFFP a demandé à la DRF de réaliser des études portant sur différentes facettes de la productivité et de la charge physique des travailleurs sylvicoles, dont notamment : une étude sur un programme d'entraînement physique adapté à ces travailleurs (section 2.2.2), une étude visant à revoir le taux accordé aux reboiseurs selon le type de gabarit de plants destinés au reboisement (section 2.2.3), une étude pour vérifier la possibilité de rémunérer à l'heure les débroussailleurs (section 2.2.4) et une étude pour comparer la charge de travail physique et la productivité de différents types de traitements sylvicoles (section 2.2.5). La DRF s'est tournée vers Polytechnique pour l'aider à monter et à mener ces études.

Polytechnique offrait une expertise en ergonomie nécessaire à l’atteinte des objectifs du MFFP à travers ces études, et effectuait, par le biais d'étudiants et de personnels de recherche, la collecte des données sur le terrain. L'équipe de Polytechnique travaillait en étroite collaboration avec la DRF que fournissait l'expertise en génie forestier nécessaire pour ces études. Dans le cadre de ces études, le MFFP permettait à l’équipe de Polytechnique d’effectuer des mesures plus approfondies en vue de répondre à différentes questions de recherche, dont notamment celles traitées dans la présente thèse (cf. section 1.3). Ce partenariat donnant-donnant offrait un contexte de recherche privilégié, d'une part, en permettant des mesures en milieu réel de travail, et d'autre part, en finançant ces mesures. En effet, le coût des études terrains est particulièrement élevé, en particulier dans le milieu forestier où les frais de déplacement aux sites de travail ajoutent significativement à la facture. Également, la nature des travaux réalisés et le financement ont permis l'acquisition d’équipements dispendieux (ex., appareils de mesures des gaz expirés, moniteur et capsules thermiques, cardiofréquencemètres, etc.). Sans ce partenariat, cette thèse n’aurait pas vu le jour.

En somme, l’équipe de chercheur de Polytechnique a joué un double rôle au fil du temps : celui de praticien en pratique professionnelle au début des années 2000 et celui de praticien en milieu de recherche au cours des dernières années. En tant que praticien en pratique professionnelle nous avons été confrontés à l'application pratique de méthodes en milieu réel de travail, ce qui a soulevé plusieurs questions de nature méthodologiques tel que mentionné plus haut. À travers les études des dernières années, nous avons été en mesure d'obtenir des données permettant de répondre à certaines de ces questions.

Durant ces études menées en forêt, les travailleurs étaient suivis sur plusieurs journées d’études, parfois à plusieurs moments durant la saison de travail. La saison de travail débute généralement au mois de mai et s'étend au mois d’octobre, mais les collectes de données débutaient généralement au mois de juillet afin de donner le temps aux travailleurs de s’acclimater au travail forestier après une longue saison morte. Parmi les journées d’étude, au moins une était toujours consacrée aux mesures prévues à la présente thèse. Un total de 131 journées de mesures effectuées sur le terrain ont ainsi été accumulées au fil des collectes depuis 2008 mettant à contribution un total de 75 travailleurs forestiers. À cela s’ajoutent 30 journées de mesures en laboratoire sur 30 sujets issus de différents milieux (aucun travailleur forestier).

Aux 4 études terrains menées depuis 2008 sur lesquelles cette thèse est basée, s'ajoute une étude de type laboratoire menée en 2007, portant sur la validation du step-test de Meyer et Flenghi (1995). Notons qu'un certificat de conformité a été obtenu auprès du Comité d'éthique de la recherche avec des sujets humains de Polytechnique pour chaque étude menée par l'équipe de recherche. La section qui suit apporte des informations sur les différentes collectes de données ayant servi de base à la présente thèse.

2.1 Description des variables d'intérêt et appareillages utilisés

Plusieurs aspects ont été traités simultanément durant les collectes de données afin de répondre aux exigences de la DRF, du MFFP ainsi qu'aux nôtres. Dans les collectes de données, les aspects de la charge physique des travailleurs forestiers, de leur productivité, de l'environnement thermique, des facteurs de site (ex. types de terrain, traitements préalables), de l'inventaire forestier (ex., espèces et densité végétale) faisaient partie intégrante des protocoles de recherches.

L'équipe de recherche était minimalement constituée d'un superviseur (l'auteur) responsable des mesures prévues, du bon fonctionnement des appareils de mesures et de la calibration des appareils, d'un(e) étudiant(e) et d'un technicien forestier d'expérience. Des chercheurs de la DRF et d'autres personnels du MFFP pouvaient agrandir l'équipe selon les variables nécessaires à la DRF. Les mesures a) à g) étaient prévues aux fins de la présente thèse:

a) Les mesures de la l'astreinte physique;

b) Les mesures de la charge physique de travail;

c) Les mesures d'astreinte thermique;

d) Les mesures d'ambiance thermique;

e) L'isolement vestimentaire;

f) Les mesures de la capacité cardiorespiratoire;

g) Caractéristiques des travailleurs;

h) Les mesures de productivité;

i) Les mesures de caractérisation de la qualité du terrain et du travail;

j) Questionnaires sur leur santé, incidents et accidents survenus durant le travail.

Les mesures d'astreinte physique (a) comprennent la fréquence cardiaque de travail et la $\dot{V}O_2$. La fréquence de travail était enregistrée en continu durant la journée entière d'étude, et ce, à intervalles de 5 s. Les intervalles R-R (durée en millisecondes entre deux battements cardiaques) ont également été enregistrés afin de corriger le bruit dans le signal cardiaque le cas échéant par un algorithme commercial de correction des artéfacts (logiciel Firstbeat Pro® version 2.2.0.9, Firstbeat Technologies, Finland). Deux types d'appareils ont été utilisés : des cardiofréquencemètres Polar (deux modèles : S810i, RS800) (Polar Electro Oy, Kempele, Finland) et le moniteur physiologique Equivital (Hidalgo, Cambridge, UK). Les deux types d'appareils ont une précision de 1 milliseconde. L'Equivital permet de mesurer un ensemble de mesures physiologiques, dont la température corporelle (capsule thermique).

La charge physique de travail (b) a été mesurée par la consommation d'oxygène. Lors des mesures terrains, deux modèles d'appareils de mesure des gaz expirés portatifs ont été utilisés : le Fitmate PRO® (COSMED, Rome, Italy)(2 appareils) et le K4b^2 (COSMED, Rome, Italy) (2 appareils). Le Fitmate PRO® a été utilisé dans la plupart des collectes de données sauf en 2013 où le K4b^2 à été utilisé (cf. section 2.3.5). Ce dernier nous a été gracieusement prêté par le département des Sciences de la santé de l'Université du Québec à Chicoutimi. L'appareil MOXUS de l'Université de Montréal utilisé pour l'étude de laboratoire et le K4b^2 sont réputés être des références (gold-standard). Ces appareils coûteux, permettent de mesurer la fraction d'O_2 et de CO_2 des gaz expirés et donc rendent une mesure de la $\dot{V}O_2$ très précise. Le Fitmate PRO®, plus abordable, ne possède qu'un capteur d'O_2 et utilise un algorithme basé sur la mesure de la fréquence cardiaque pour estimer le quotient respiratoire nécessaire afin d'obtenir une mesure précise de la $\dot{V}O_2$. Tous ces appareils ont fait l'objet d'études validant leur précision (Beltrami, Froyd, Mamen et Noakes, 2014; Mc Naughton et Sherman, 2005; Nieman *et al.*, 2006, 2007).

La calibration des appareils était faite avant chaque test et période de mesure à l'aide de gaz de références (MOXUS et K4b^2) et d'une seringue de 3L pour calibrer l'anémomètre. La calibration dure environ 1 heure. Durant les mesures terrains, la calibration était effectuée le matin.

La mesure de l'astreinte thermique (c) (température corporelle) a été mesurée par la température intra-abdominale à l'aide de la capsule thermique Jonah® (Philips Respironics, Murrysville, PA) dont la précision du thermocouple interne est de ±0.1°C. La capsule transmet par onde radio les

mesures à intervalles d'une minute. Le moniteur Vitalsense (Philips Respironics, Murrysville, PA) a été utilisé dans la plupart des collectes de données jusqu'à sa discontinuité en 2011, ce qui a motivé l'acquisition de l'Equivital qui remplaçait le Vitalsense.

Les mesures d'ambiance thermique (d) consistaient à la température de l'air (T_a; °C), la température humide psychrométrique (T_h; °C), la température du globe noir (T_g; °C), l'humidité relative (RH; %), la pression atmosphérique (P_a; kPa) et la vitesse de l'air (V_a; m/s). Ces mesures ont été relevées à chaque collecte de données à l'aide d'une station météo montée sur trépied à proximité du site où le travailleur forestier réalisait son travail. Les mesures étaient relevées à intervalle de 10 secondes, le plus petit intervalle possible pour enregistrer les valeurs sur une journée complète de travail selon la mémoire de l'appareil utilisé. Les appareils de mesures utilisées étaient un psychromètre numérique de modèle Kestrel 4000 (Nielsen-Kellerman Co., Boothwin, PA). Le Kestrel est un appareil portatif, léger, résistant aux intempéries qui permet de mesurer l'ensemble des variables sauf la température du thermomètre globe. Le Kestrel était monté sur une girouette de la même compagnie afin d'enregistrer la vitesse de l'air associée au vent dominant. La température du globe noir a été mesurée à l'aide d'un dispositif maison comprenant un thermocouple permettant l'enregistrement des mesures (datalogger)(Lascar USB-TC, Lascar Electronics, Salisbury, UK) monté dans une boule noire en plastique. Le thermomètre globe répondait aux principes de design reconnus (ISO 7243:1989; Parsons, 2014). La température humide psychrométrique était convertie en température humide naturelle à l'aide des formules de Kamon et Ryan (1981). Enfin, l'indice WBGT était calculé suivant la formule proposée par ISO 7243 (1989).

Chaque pièce de vêtement porté par le travailleur, ainsi que les caractéristiques du vêtement (type, type de tissu, nombre, etc.) étaient méticuleusement notées avant le début de la journée de mesure. Des photographies du sujet de face et de dos étaient généralement prises afin de pouvoir y revenir si certaines pièces n'avaient pas été notées. Chaque pièce retirée ou ajoutée par le travailleur pendant la journée de travail était également notée. L'isolement vestimentaire (e) était estimé en additionnant les valeurs individuelles des pièces de vêtements portés à partir des tables de la norme ISO 9920:2007. La valeur intrinsèque d'isolement (Icl), dont l'unité de mesure est le clo, permet de décrire l'isolement statique. Plus la valeur d'isolement est grande, plus les échanges de température avec l'environnement sont diminués. À titre d'exemple, un sujet portant un ensemble de sport léger consistant en un short, un t-shirt en coton, une paire de bas, une paire de caleçons

courts et une paire de souliers de course, a une tenue vestimentaire ayant une valeur d'isolement de 0.4 clo. Pour un sujet en habit de travail normal, l'isolement vestimentaire varie entre 0.6 et 1.0 clo (ex., un pantalon, une chemise, des sous-vêtements courts, une paire de souliers de ville ou un habit complet incluant veston, pantalon et cravate). L'isolement vestimentaire d'une personne portant une combinaison hivernale, manteau et salopette de ski par exemple, peut être aussi élevé que 6 clo.

Pour les travailleurs forestiers étudiés, l'isolement moyen observé au fil des collectes de données était en moyenne de 1.1 clo pour les débroussailleurs et de 0.94 clo pour les reboiseurs. L'isolement vestimentaire peut varier grandement d'un sujet à l'autre et dans une même journée de travail par l'ajout d'une veste et d'un pantalon imperméable. Dans cette condition l'isolement vestimentaire maximal était estimé à 1.7 clo. L'isolement statique peut-être ajusté pour tenir compte de l'effet de pompage des mouvements du corps. Pour les besoins de cette étude, l'effet de pompage n'a pas été pris en compte. D'une part, parce qu'il n'est généralement pas considéré dans les valeurs rapportées dans la littérature de sorte qu'il est plus facile de comparer l'isolement vestimentaire observé sur le terrain aux valeurs publiées. D'autres parts, parce que chez les travailleurs forestiers, l'effet de pompage est généralement négligeable du fait que les entrées (manches, jambière et col) sont fermées pour se protéger des mouches et moustiques.

La capacité cardiorespiratoire ($\dot{V}O_2$max)(f) a été mesurée au moyen d'un test maximal sur tapis roulant (étude en laboratoire) et estimée par extrapolation à la fréquence maximale théorique du sujet de la relation HR-$\dot{V}O_2$ établie par le step-test de Meyer et Flenghi (1995)(études sur le terrain). Le protocole du test maximal sur tapis roulant est décrit à la section 4.3.1.6. Le protocole du step-test de Meyer et Flenghi est décrit à la section 4.3.1.5. Les mesures de $\dot{V}O_2$ ont été relevées lors des tests maximaux sur tapis roulants par un chariot métabolique (MOXUS Metabolic System, AEI Technologies, Naperville, IL, USA). Les mesures de $\dot{V}O_2$ lors des step-tests sur le terrain ont été relevées avec les appareils portatifs décrits plus haut (mesures de la charge physique de travail [b]).

Les caractéristiques des sujets (g), c'est-à-dire l'âge, le poids et la taille étaient notés. Le sujet était pesé le matin avant le déjeuner lorsque possible (au camp forestier) ou sur les lieux de travail (chemin forestier) à l'aide d'une balance portative. D'autres caractéristiques des travailleurs, scolarité, expérience de travail, lieu de résidence, type de débroussailleuse utilisée, etc. étaient également notés.

D’autres mesures (h et i) étaient également relevées par l’équipe de recherche spécifiquement pour les besoins du MFFP. Ces mesures comprenaient la productivité mesurée au moyen d’un GPS (Garmin GPSMAP 60Cx), des mesures de caractérisation des facteurs de site (pente, obstacles, etc.), d’un inventaire (espèces végétales et densité de recouvrement) avant traitement, et de la qualité du traitement au moyen d’un inventaire après traitement. Enfin, des questionnaires sur la santé du travailleur (douleurs musculosquelettiques), incidents et accidents survenus durant le travail ont également été utilisés dans certaines collectes de données.

2.2 Collectes de données

Cette section dresse un portrait de chaque collecte de données en décrivant l’objectif général de la collecte, le nombre de sujets, les variables mesurées, les difficultés rencontrées, ainsi que le sous-échantillon résultant retenu pour la thèse. La table 2.1 résume ces informations.

2.2.1 Étude laboratoire sur validation du step-test de Meyer et Flenghi (1995) à l’aide d’un test maximal sur tapis roulant.

Cette étude, menée entre novembre 2007 et février 2008, visait deux objectifs. Le premier consistait à valider le step-test de Meyer et Flenghi (1995) à l'aide d'un test à l'effort maximal sur tapis roulant. Le second consistait à évaluer l'impact de deux niveaux d'isolement vestimentaire sur la valeur de $\dot{V}O_2max$ prédite par le step-test de Meyer et Flenghi. Un total de 30 sujets, tous masculins, issus de différents milieux âgés entre 21 ans et 46 ans ont participé à l’étude. Chaque sujet a effectué deux step-tests de Meyer et flenghi suivi d’un test maximal sur tapis roulant. Les tests étaient réalisés au laboratoire de Kinésiologie de l’Université de Montréal. Le protocole de recherche a reçu un Certificat de conformité par le Comité d’éthique pour un projet de recherche avec des sujets humains (CÉR-07/08-04, délivré le 12 novembre 2007). Une description détaillée du protocole de recherche est disponible à la section 4.3.1.

Des pertes de signal dans la mesure de la fréquence cardiaque durant l’un des tests chez 4 sujets ont été observées après extraction des données pour analyse. Ces sujets n’ont malheureusement pas pu être remplacés de sorte que la base de sujet résultante a été de 26 sujets.

Cette étude a fait l'objet d'un rapport de recherche remis à l'IRSST (Imbeau, Dubé et Wadell, 2009). Les données de cette étude ont été utilisées pour le second article de cette thèse (Chapitre 4).

2.2.2 Les effets d'un entraînement physique pré-saison sur le travail et la sécurité des travailleurs forestiers.

L'objectif de cette étude était de vérifier la faisabilité d'une approche visant à évaluer les effets d'un programme d'entraînement physique pré-saison (PEPTF) sur la condition physique, l'astreinte physique de travail, la productivité et les accidents durant le travail chez les travailleurs forestiers (Imbeau, Dubé, Dubeau et Lebel, 2010).

12 travailleurs forestiers recrutés dans une entreprise sylvicole de la région du Bas-St-Laurent ont participé à l'étude. Les travailleurs étaient suivis sur le terrain pendant une journée complète de mesures et ce, à quatre moments durant la saison entre les mois de juin à octobre 2008 afin de mesurer l'effet longitudinal du programme d'entraînement physique. Un Certificat de conformité éthique a été obtenu du Comité d'éthique de la recherche avec des sujets humains de Polytechnique (CÉR-07/08-17, délivré le 2 mai 2008).

Un total de 48 journées de mesures étaient prévues initialement. Six sujets ne se sont pas présentés à l'un des moments et donc l'ensemble complet des mesures a été obtenu pour 40 journées. Dans cette collecte de donnée, nous ne possédions pas d'appareil de mesure des gaz expirés. Aucune mesure de $\dot{V}O_2$ n'a donc été effectuée. La mesure de la température corporelle et de la fréquence cardiaque permettait d'appliquer les méthodes de Kampmann et al. (2001) et de Vogt et al. (1970, 1973). Ces données ont donc uniquement été utilisées aux fins de l'article 3 (chapitre 5).

Du nombre total de 40 journées de mesures possibles, une mesure fiable de la température corporelle n'a pu être obtenue dans 22 journées et une mesure fiable de la fréquence cardiaque n'a pu être obtenue pour 3 autres. Des données utilisables ont donc pu être obtenues pour un total de 15 journées de mesures chez 10 des 12 travailleurs. Pour 4 sujets, des journées de mesures ont été obtenues à différents moments. Compte tenu du fait que plus d'un mois sépare les moments de mesure et que le type de travail forestier réalisé diffère à chacun des moments, les 15 journées restantes ont été traitées comme si chacune avait été réalisée par des sujets différents.

2.2.3 Performance organisationnelle et productivité des reboiseurs lors de la mise en terre de plants forestiers.

L'objectif de cette étude était de comparer la productivité de reboiseurs pour sept gabarits de plants (combinaisons de récipients et de dimensions de plants) afin de dresser un portrait quantitatif de l'opération de reboisement pour tenir compte à la fois des impératifs logistiques et de la productivité des reboiseurs dans l'estimation de la valeur de ce traitement (Dubeau, Imbeau, LeBel et Dubé, 2010).

Un total de quinze reboiseurs, deux sujets féminins et 13 sujets masculins ont participé à l'étude durant deux semaines dans leur site de travail habituel durant la saison de travail 2009 (Certificat de conformité éthique délivrée le 2 juin 2009; CÉR-08/09-14). Chaque reboiseur mettait en terre quatre différents types de gabarits, à raison de deux jours par type. La première journée était affectée à l'acclimatation et aux mesures prévues aux fins de cette thèse, tandis que la deuxième journée était affectée à l'étude de productivité comme telle. Au total 15 journées de mesures sur 15 sujets différents étaient disponibles pour la présente recherche.

Des pertes de signal de fréquence cardiaque important chez 5 des sujets ont été observées durant cette collecte. Possiblement dû aux mouvements fréquents du tronc pour planter. Chez 6 sujets, une mesure de la $\dot{V}O_2$ fiable n'a pu être obtenue durant la période de travail. Aussi, des pertes de signal de température corporelle ont été observées chez 6 sujets. Pour 7 autres, des perturbations importantes dans la mesure de la température corporelle due à l'ingestion d'eau trop froide au cours de la journée de travail ont rendu les valeurs enregistrées inutilisables. Les 5 sujets restants, pour

qui les mesures de la température étaient utilisables, étaient aussi ceux pour qui les pertes de signal de la fréquence cardiaque ont été observées. En résumé, aucune donnée de cette étude n'a pu être utilisée aux fins de l'article 3, néanmoins, chez 10 sujets, tous masculins, des mesures d'astreinte physique et de charge de travail utilisables ont pu être obtenues et utilisées pour les articles 1 et 2 (chapitres 3 et 4).

2.2.4 Étude préliminaire de l'effet d'une rémunération horaire sur la productivité du débroussailleur en fin de carrière.

Une étude pilote a été menée afin de tester l'introduction de la rémunération horaire chez les débroussailleurs en fin de carrière. L'impact de la rémunération horaire sur la charge physique de travail, la productivité, la satisfaction des débroussailleurs et la déclaration de douleurs a été exploré. Un total de 28 sujets âgés de plus de 40 ans, tous masculins, et admissibles ont participé à l'étude. Ils ont été choisis parmi 4 entreprises localisées dans les régions du Lac-Saint-Jean, des Appalaches, de la Mauricie et du Bas-St-Laurent.

La collecte de données a été réalisée à deux moments durant la saison de travail 2011. Un Certificat de conformité éthique a été obtenu pour cette étude le 15 juin 2011 (CÉR-11/12-04). Une première collecte a eu lieu en juillet-août alors que les débroussailleurs étaient payés à forfait (moment 1). Une seconde collecte a eu lieu en septembre-octobre alors que les débroussailleurs étaient payés à l'heure (moment 2). Une période de familiarisation à la rémunération horaire a eu lieu entre les deux moments. Les sujets étaient suivis pendant une semaine complète de travail. Une des journées de la semaine était consacrée aux mesures nécessaires à la présente thèse. Six sujets ont quitté l'étude au cours du moment 1 de sorte que 22 sujets ont été suivis au moment 2. Au total 48 journées de mesures prévues ont été réalisées. Un binôme de travailleurs était suivi lors d'une même journée. Le protocole de recherche ne permettait malheureusement pas de mesurer la $\dot{V}O_2$ pour l'ensemble des journées de mesures en raison de l'éloignement des lieux de travail. Ainsi, la mesure de la $\dot{V}O_2$ a été obtenue pour la moitié des sujets à chaque moment de sorte que 25 sujets de cette étude ont pu être utilisés pour les articles 1 et 2 de la thèse (chapitre 3 et 4).

Lors de la première partie de la collecte de données (moment 1), les deux moniteurs Vitalsense ont cessé de fonctionner. Il n'était plus possible d'activer les capsules thermiques. La température corporelle a donc pu être mesurée uniquement pour 8 sujets. Il n'a pas été possible de remplacer les moniteurs avant le début de la deuxième partie de la collecte (moment 2) et donc la température corporelle n'a pu être mesurée à ce moment-là. De ces 8 sujets, 4 sujets ont présenté des pertes de signal cardiaque importantes (1 sujet) et de mesure de la $\dot{V}O_2$ (3 sujets). De sorte que seulement 4

Tableau 2.1: Synthèse des échantillons de sujets suivis dans les collectes de données et sous-échantillons retenues pour les articles.

	2007 (2.2.1)	**2008 (2.2.2)**	**2009 (2.2.3)**	**2011 (2.2.4)**	**2013 (2.2.5)**
Type d'étude	Laboratoire	Terrain	Terrain	Terrain	Terrain
Sujet	Population générale	Débroussailleur	Reboiseur	Débroussailleur	Débroussailleur
Moment	1	4	1	2	1
Nombre de sujets suivis par moment	30	12	15	28 au moment 1 22 au moment 2	20
Total des journées de mesures possibles	30	40	15	48	20
Mesures réalisées	f	a, c, d, e, f (estimée), g, h, i, j	a, b, c, d, e, f (estimée), g, h, i	a, b, c, d, e, f (estimée), g, h, i, j	a, b, c, d, e, f (estimée), g, g, h, i
Appareil de mesure d'astreinte physique et thermique					
Fc	Polar S810i	Polar RS800	Polar RS800	Polar RS800	Equivital
$\dot{V}O_2$	Moxus	-	Fitmate Pro	Fitmate Pro	K4b[2]
Tc	-	Vitalsense	Vitalsense	Vitalsense	Equivital
Sous échantillon retenu par article					
Article 1 (chapitre 3)	-	-	10	25	15
Article 2 (chapitre 4)	26	-	10	25	15
Article 3 (chapitre 5)	-	15	0	4	11

a) Les mesures de la l'astreinte physique; b) Les mesures de la charge physique de travail; c) Les mesures d'astreinte thermique; d) Les mesures d'ambiance thermique; e) L'isolement vestimentaire; f) Les mesures de la capacité cardiorespiratoire; g) Caractéristiques des travailleurs; h) Les mesures de productivité; i) Les mesures de caractérisation de la qualité du terrain et du travail; j) Questionnaires sur leur santé, incidents et accidents survenus durant le travail.

sujets ont pu être utilisés pour l'article 3 (chapitre 5).

2.2.5 Évaluation de la naturalité, du rendement et de la productivité des débroussialleurs pour différentes modalités d'éclaircie précommerciale.

Cette étude visait à développer des indices caractérisant le niveau de naturalité (caractère sauvage) d'un peuplement, de comparer les niveaux de naturalité de quatre types de traitements mécaniques de la régénération et d'estimer les coûts de réalisations des traitements.

La collecte de donnée s'est déroulée sur une période de 4 semaines durant les mois de juillet et août au cours de la saison de travail 2013. 20 sujets, tous masculins, recrutés dans une entreprise sylvicole de la région de Saguenay ont participé à cette étude. Chaque sujet était suivi pendant 3 journées d'étude dont une était consacrée aux mesures. Une chercheuse de la direction de la recherche forestière du MRNF et une étudiante au baccalauréat en kinésiologie de l'Université du Québec à Chicoutimi formée aux mesures et au protocole expérimental se sont occupées de la collecte des données. Le protocole général a été suivi à la différence que les step-tests ont été effectués à l'intérieur dans le local des contremaîtres du camp forestier plutôt qu'à l'extérieur près du site de travail. Ce local était suffisamment grand et haut pour accommoder les sujets. Aussi, lors des journées de mesures prévues, la fréquence cardiaque et la température corporelle ont été enregistrées à l'aide de l'appareil Equivital. La $\dot{V}O_2$ a été mesurée à l'aide de deux appareils de mesure des gaz expirés K4b^2.

Cette collecte de donnée n'a pas fait l'objet d'une demande au Comité d'éthique de la recherche avec des sujets humains de Polytechnique (CÉR) comme les précédentes en raison du fait que cette étude a été menée entièrement par la DRF et son personnel Le rôle de Polytechnique a été limité à celui de conseil auprès de l'équipe ayant mené l'étude. Néanmoins, les procédures d'usage en la matière ont été suivies : explication des objectifs de l'étude et du protocole aux travailleurs avant le début de la collecte de donnée, consentement libre et informé, questionnaire sur l'aptitude physique (Q-AAP) et questionnaire pour la capsule thermique (cf. annexe A).

Tôt durant la collecte de mesure, un des appareils K4b^2 a fait défaut ce qui a entraîné un alourdissement considérable des journées de mesure. D'une part, les step-tests ne pouvaient plus être effectués simultanément ce qui a entraîné une perte de temps d'une heure. D'autre part, un seul appareil était disponible pour faire les mesures sur le terrain, ce qui a compliqué la collecte étant

donné que les lieux de travail peuvent être localisés à des distances éloignées, obligeant l'une des membres de l'équipe de recherche à se déplacer d'un site à l'autre. La consommation d'oxygène durant la période de travail n'a donc pas pu être mesurée chez 5 sujets. 15 sujets au total ont pu ainsi être utilisés pour les articles 1 et 2 (chapitre 3 et 4).

La mesure de la fréquence cardiaque par l'Equivital a également posée problème. Un niveau élevé de bruit de signal a été observé sur la durée entière de mesure dans la majorité des cas (Figure 2-1). Sur les 20 journées de mesures, seules trois n'ont pas été affectées. On ne s'explique pas d'où vient le bruit observé. L'ajustement de la bande de corps peut avoir eu un impact chez certains sujets minces. L'interférence avec le harnais porté par le travailleur peut également avoir joué un rôle. Or, un problème de cette ampleur n'a jamais été observé avec les cardiofréquencemètres Polar dans les mêmes conditions. La technologie utilisée par l'Equivital, qui se base sur la mesure ECG par trois électrodes semble expliquer la difficulté vécue. Néanmoins, la mesure de la fréquence cardiaque à pu être récupérée pour la majorité des mesures en utilisant un algotihtme commercial de correction des artéfacts des intervalles R-R (logiciel Firstbeat Pro® version 2.2.0.9, Firstbeat Technologies, Finland). La correction des artéfacts a pu être vérifiée en comparant la fréquence cardiaque nettoyée avec la fréquence cardiaque mesurée simultanément par l'appareil K4b^2 lors des périodes de mesures de la $\dot{V}O_2$ durant le travail forestier.

L'un des sujets a présenté une contre-indication à la capsule thermique et donc la mesure de la température corporelle n'a pu être effectuée pour lui. Aucune donnée de température corporelle n'a été enregistrée chez 3 sujets, résultant en 11 sujets utilisables pour l'article 3 (chapitre 5).

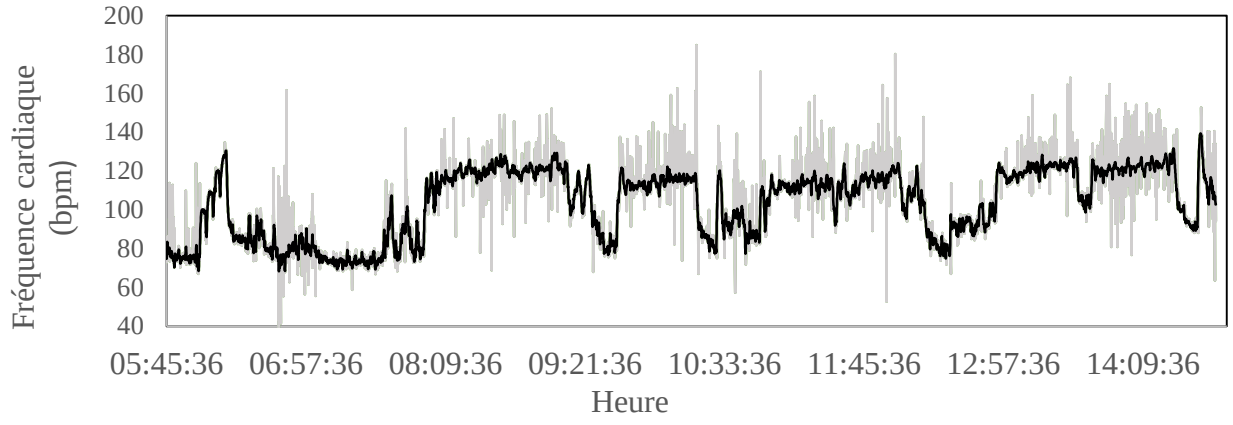

Figure 2-1: Example de signal cardiac bruité (gris) et nettoyé (noir) d'un sujet lors d'une journée de mesure.

CHAPTER 3 : ARTICLE 1 : REMOVING THE THERMAL COMPONENT FROM HEART RATE PROVIDES AN ACCURATE $\dot{V}O_2$ ESTIMATION IN FOREST WORK

Philippe-Antoine Dubé [a*], Daniel Imbeau [a], Denise Dubeau [b], Luc Lebel [c], Ahmet Kolus [a]

[a] Department of Mathematics and Industrial Engineering, Polytechnique Montréal, Montréal, Canada

[b] Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière, Québec, Canada

[c] Department of Forest and Wood Sciences, Université Laval, Québec, Canada

** Corresponding author*

Address: C.P. 6079, Succursale Centre-Ville, Montréal (Québec), Canada, H3C 3A7

E-mail address: philippe-antoine.dube@polymtl.ca

Article soumis pour publication dans le journal *Applied Ergonomics* le 30 juillet 2014.

3.1 Abstract

Heart rate (HR) was monitored continuously in 41 forest workers performing brushcutting or tree planting work. 10-min seated rest periods were imposed during the workday to estimate the HR thermal component (ΔHR_T) per Vogt et al. (1970, 1973). $\dot{V}O_2$ was measured using a portable gas analyzer during a morning submaximal step-test conducted at the work site, during a work bout over the course of the day (range: 9 to 74 min), and during an ensuing 10-min rest pause taken at the worksite. The $\dot{V}O_2$ estimated, from measured HR and from corrected HR (thermal component removed), were compared to $\dot{V}O_2$ measured during work and rest. Varied levels of HR thermal component were observed ($\Delta HR_T avg$ range: 0 to 38 bpm). Using raw HR significantly overestimated measured work $\dot{V}O_2$ by 30% on average (range: 1% to 64%). 74% of $\dot{V}O_2$ prediction error variance was explained by the HR thermal component. $\dot{V}O_2$ estimated from corrected HR was not statistically different from measured $\dot{V}O_2$. Work $\dot{V}O_2$ can be estimated accurately in the presence of thermal stress using Vogt et al.'s method, which can be implemented easily and with inexpensive instruments by the practitioner.

Keywords: work metabolism; heart rate; heat stress; prediction bias.

3.2 Introduction

Assessment of work energy expenditure (or metabolic rate) is a key parameter in the evaluation of the physical aspect of work in occupational ergonomics, especially when using thermal stress indices (e.g., TWL, PHS, WBGT, IREQ, PMV-PPD), and in the determination of work-rest regimens for physical work (ACGIH, 2013; Brake & Bates, 2002; ISO 11079:2008; ISO 7730:2006; ISO 7933:2004). Oxygen consumption ($\dot{V}O_2$) has been used extensively in sports and in controlled settings to estimate metabolic rate (Åstrand & Rodahl, 1986). But the obligation to wear a mask is invasive and unacceptably uncomfortable to many workers so that measurement durations in work settings are often restricted to short periods of time especially when working in hot conditions. On the other hand, heart rate (HR) is a very cost effective non-invasive measure that can be easily and safely obtained over long work periods (e.g., complete work shift) and can be used as a replacement to $\dot{V}O_2$ to estimate metabolic rate (ISO 8996:2004). A submaximal test is often performed to establish a subject's HR-$\dot{V}O_2$ relationship from which metabolic rate can be estimated to within ±10% according to ISO 8996 (2004). However, factors such as size of working muscle groups, static work components, steady or non-steady-state work, ambient temperature, stress and dehydration are known to increase HR without a subsequent increase in $\dot{V}O_2$ (i.e., cardiovascular drift) (Coyle and González-Alonso, 2001; Coyle, 1998; Nielsen & Meyer, 1987; Wingo, Ganio & Cureton, 2012). These factors if present during work HR measurement will lead to an overestimation of $\dot{V}O_2$ if they were not present during the submaximal test (Nielsen & Meyer, 1987). Ways to control them include, for instance, ensuring they are present during the submaximal test such as having a test that uses similar muscle groups as in the work to be studied, or by administering the test near the actual worksite so as to have similar test and work conditions (Nielsen & Meyer, 1987). This is seldom possible in the case of thermal stress since it can vary greatly between time of the test (often early in the morning) and time of work measurement, especially when work is performed outdoors (e.g., forestry, agriculture).

Vogt et al. (1970, 1973) proposed a simple method to assess the heat stress contribution to the heart rate (i.e., HR thermal component or ΔHR_T, see also (ISO 9886:2004) to improve the estimation of $\dot{V}O_2$ by using only the motor component (ΔHR_W), which is related to the physical work performed and determines metabolic rate. The method hypothesizes that the heat strain component develops progressively during work and remains stable during the first minutes of the ensuing rest break (J.

J. Vogt *et al.*, 1973). During that time, the subject recovers from the physical work performed (motor component) and accordingly, a fast decrease in heart rate can be observed. After the first minutes have elapsed the heat accumulated in the body (i.e., HR thermal component), begins to dissipate gradually and accordingly from that point on HR decreases slowly to eventually reach the resting level. In Vogt et al.'s method, the HR thermal component can be estimated during a 10-min seated rest pause following immediately a work period (Figure 3-1). The HR thermal component at the end of the work period is calculated as the HR elevation above resting value at or near the 4th minute after the beginning of the rest pause, that is when recuperation of the motor component is thought to be complete. This method allows the assessment of the HR thermal component when HR data is collected in the presence of heat stress, which is often the case in actual work conditions. Imbeau, Desjardins, Dessureault, Riel and Fraser (1995) applied Vogt et al.'s method to estimate the metabolic rate of scaffolding work. However, very few studies have been published in peer-reviewed journals on the practical application of this method or on the accuracy of estimating $\dot{V}O_2$ that can be achieved with it in actual work settings. Using a different approach based on rectal temperature and heart rate measurements to estimate the HR thermal component, Kampmann et al. (2001) have shown that the mean metabolic rate estimation in mining work can be reduced by 25% when the HR thermal component is taken into account. Such an overestimation error is significant and can change radically the outcome of a risk analysis performed with any of the thermal stress indices cited above or compromise the determination of productive work-rest regimens for physical work.

The present study aims to characterize the $\dot{V}O_2$ estimation error associated with HR measured (raw) HR during work and with HR corrected (thermal component removed) per Vogt et al. (1970, 1973). The $\dot{V}O_2$ estimations from HR (uncorrected and corrected) are then compared to actual $\dot{V}O_2$ measurements performed during forest work in widely varying thermal conditions so as to elicit different HR thermal components (ΔHR_T).

3.3 Methods

3.3.1 Subjects

This study used the data collected in three research projects on physical workload and productivity of forest workers conducted in various regions of the Province of Québec (Canada). Subjects were 10 tree planters and 40 brushcutters, all males with a minimum experience of three years who were representative of their group in terms of work productivity (tree planting: 2500 trees per day; brushcutting: one hectare per week) and could undertake a submaximal test according to the PAR-Q questionnaire. Smokers (N=9) were allowed since they still represent an important proportion of the worker population in this industry. All subjects signed an informed consent before participating in the study. All workers were observed for one complete workday. Measurements took place in the months of July to October between 2009 and 2013. Age characteristics were different between tree planters (mean ± s.d. = 25 ± 2.0 years; range = 23 to 28 years) and brushcutters (mean ± s.d. = 50 ± 9.8 years; range = 22 to 67 years) since the former are generally younger in this industry. This dataset was intended to provide a wide age range. Table 3.1 summarizes the subjects' characteristics.

3.3.2 Procedure

Subjects were met in the morning before the beginning of their workday either outside the forest camp where they lodged (n=42) or directly on the side of the road near their day's worksite (n=8) to review the experimental procedure. A HR monitor (RS800, Polar Electro Oy, Kempele, Finland) set to record at 5 s intervals was doned and kept until the end of the work day. The subject took a seated rest during which a portable $\dot{V}O_2$ measuring apparatus was installed. Two different instruments were used: a Fitmate Pro (Cosmed, Rome, Italy) was used in n=35 subjects and a K4b^2 (Cosmed, Rome, Italy) in n=15 subjects. Both instruments have been validated against the Douglas bag over $\dot{V}O_2$ values ranging from rest to maximal aerobic capacity (McLaughlin, King, Howley, Basset & Ainsworth, 2001; Nieman et al., 2006, 2007). The subject took a submaximal step-test (Figure 3-1, leftmost image) with his regular work clothes but not the protective equipment (helmet, gloves and harness). Most step-tests took place outdoors due to the lack of infrastructures in forest settings (n=35). The Meyer and Flenghi (1995) step-test was used since it offers several advantages: simple, cost-effective, and practical, it can be implemented safely without imposing

high cardiac strain, particularly for older and less active individuals. Imbeau et al. (2010) showed that the highest exertion level on this test reached by a group of forest workers corresponded well to the exertion generally measured during typical brushcutting work. Apud, Bostrand, Mobbs & Strehlke (1989) showed that using a standardized test procedure involving mainly the lower limbs (e.g., ergocycle, step-test) is a valid approach for estimating $\dot{V}O_2$ from HR measurements in forest work involving the muscular mass of both lower and upper limbs (ex., brushcutting and tree planting). An additional advantage of the Meyer and Flenghi step-test is that the constant step frequency (15 steps per min paced with a metronome) is sufficiently low for any worker to be able to keep pace at all four step heights, for superior overall test precision and robustness. The equipment consists of a lightweight portable bench with a height-adjustable step (11.5, 21.5, 31.5, and 41.5 cm). The dimension of the bench (50 cm x 46 cm x 42 cm) is small enough to be easily implemented just about anywhere (e.g. side of logging road). In this test, after a 5-minute sitting rest to obtain resting heart rate, participants are asked to stand in front of the bench for 2 minutes. The test starts with the participant stepping onto and off the lowest step height for 3 minutes, followed by a short, 30-second standing rest in front of the bench while the experimenter increases the step height by sliding the step out of the lowest set of tracks and into the second-height tracks. This 3.5-minute cycle is then repeated for the three remaining step heights. The $\dot{V}O_2$ measuring apparatus is normally not required in the Meyer and Flenghi's step-test (only a heart rate monitor), but it was used in this study to obtain a precise subject's HR-$\dot{V}O_2$ relationship. The total duration of the step-test is 20.5 min and is short enough not to excessively burden the workers before their workday.

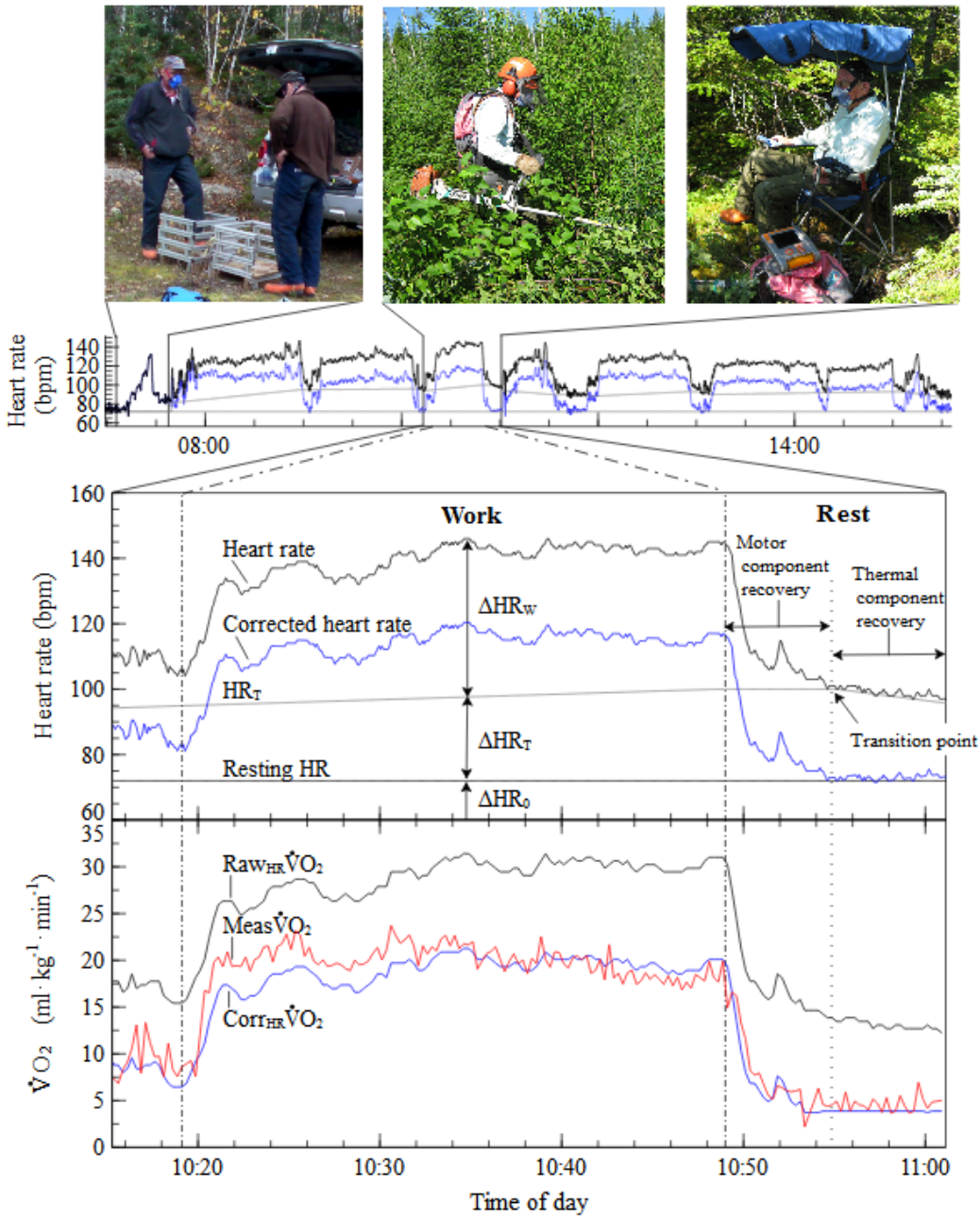

Figure 3-2: Schematics of the experimental procedure. Top chart displays measured (raw) heart rate (HR) (black), HR thermal component or HR_T (grey), and corrected HR (blue) profiles for a complete workday and the morning step-test. Middle chart displays a close-up view of the $\dot{V}O_2$ measurement period. Bottom chart displays measured $\dot{V}O_2$ (red) and the resulting predicted $\dot{V}O_2$ values using raw HR (black) and corrected HR (blue).

The previous day, every subject had been reminded not to drink coffee, smoke or engage in strenuous activity in the morning prior to the step-test. It was possible to ensure that these conditions were met for all subjects lodging at the forest camp (n=42). Upon completion of the step-test, the $\dot{V}O_2$ measuring apparatus was removed and the worker released to start his regular workday. Worker heart rate was continuously measured throughout the day with the heart rate monitor. Oxygen consumption was measured with the subject carrying the $\dot{V}O_2$ measuring apparatus (Figure 3-1 center image) for an average duration of 42 min (range: 17 to 84 min) during the work day; this measurement included a work phase (average duration: 29 min, range: 9 to 74 min) and a 10-min seated rest phase (average duration: 10 min, range: 8 to 12 min). The $\dot{V}O_2$ measuring apparatus could not be used any longer since it was deemed uncomfortable by the workers. The oxygen consumption measurement were conducted at mid-morning (34% of the cases) or mid-afternoon (66% of the cases) so as to correspond to different ambient conditions.

Four seated 10-min rest pauses were taken by the subject at his work site during the workday (mid AM, before lunch, mid PM, and end of workday) to assess the HR thermal component using Vogt et al.'s method at four moments of the work shift. As suggested by Vogt et al. (1970), the rest pauses always followed the most physically demanding part of the work cycle (planting or brushcutting work) and preceded any work activity that could contribute partially to rest (e.g., walking, tree rebagging, filing the blade, filling with gas). A portable chair with a hood to protect against the sun was installed in the shade whenever possible (Figure 3-1 rightmost image). Subjects were not allowed to eat, speak or move during the pauses to ensure a HR recuperation profile as smooth as possible.

An experimenter followed the subject during the day to note his every activity including changes in clothing. Ambient conditions (dry bulb temperature - Ta, globe temperature - Tg, air velocity - Va, relative humidity - RH, and atmospheric pressure) were measured during the step-test and recorded throughout the day at 5 s intervals at the work site as close to the worker as possible using a tripod-mounted Kestrel® 4000 weather meter (Nielsen-Kellerman Co., Boothwin, PA) equipped with a vane and globe thermometer. All measuring devices were synchronized to GPS time every morning before the beginning of data collection. The $\dot{V}O_2$ measuring apparatus' flowmeter was calibrated following the manufacturer’s directions every evening in preparation for the next day using a 3 liters syringe. The k4b2 gas sensors were calibrated with reference gas every morning.

3.3.3 Data processing

The HR and the breath-by-breath $\dot{V}O_2$ data collected were examined to detect missing or aberrant data points. Data missing for longer than one consecutive minute or by more than 10% of the data points during the step-test (n=4) or during the $\dot{V}O_2$ measurement period (n=4) or both (n=1) were removed from the dataset. The final dataset included 41 measurements from 7 tree planters and 34 brushcutters. The breath-by-breath $\dot{V}O_2$ data were further examined to exclude aberrant breaths caused by coughing, swallowing, mask leakage, etc. and values higher or lower than 3 standard deviations from the local mean were removed (Lamarra, Whipp, Ward & Wasserman, 1987). The resulting breath-by-breath values were smoothed using a 7-breath centered average and then reduced to 15 s stationary averages to reduce noise (Robergs, Dwyer & Astorino, 2010). The *HR*-$\dot{V}O_2$ relationship for each subject was obtained by linear regression analysis using the last minute HR and $\dot{V}O_2$ averages from each step-test exertion level (one rest and 4 steps)(Meyer & Flenghi, 1995). Rest HR was calculated as the 1st percentile of the measurements over the workday (Mairiaux & Malchaire, 1990). In 46% of the subjects (n=19), this rest HR value was below that measured during the morning seated rest preceding the step-test. The 1st percentile HR value was used to calculate the HR thermal component.

According to Vogt et al. (1973), the duration of the motor component recuperation averages 4 minutes, but it can vary between subjects (e.g., acclimatization, fitness). Hence, in this study, the transition point between motor and thermal recuperation was determined graphically through close examination of the HR profile of the 10-min seated rest pauses. The transition point is located at the sudden change in the recuperation curve profile; i.e., a fast decrease changing to a slow decrease, occurring usually around the 4th minute of rest (Figure 3-1). The HR thermal component was calculated as the average HR values over a 1-min time window centered at the transition point. Per Vogt et al. (1973), a linear increase of the HR thermal component over time (ΔHR_T) was plotted between the end of a 10-min rest pause and the beginning of the following pause (Figure 3-1). Each subject's ΔHR_T profile was then subtracted from his measured HR profile (raw HR) throughout the same period, yielding a corrected HR profile. The increase in the HR thermal component over time was averaged over the work period yielding $\Delta HR_T avg$.

ΔHR_T and measured $\dot{V}O_2$ were synchronized by superimposing the raw HR profiles from the HR monitors from both instruments (Polar and Cosmed). The three resulting profiles —Raw HR,

corrected HR and measured $\dot{V}O_2$— were then averaged over the measurement period (work bout, and ensuing 10-min rest) yielding $Meas\dot{V}O_2$, *Raw*HR and *Corr*HR. For each $Meas\dot{V}O_2$ value, two predicted $\dot{V}O_2$ values were calculated using the subject's *HR*-$\dot{V}O_2$ relationship: the first $Raw_{HR}\dot{V}O_2$ with *Raw*HR, and the second $Corr_{HR}\dot{V}O_2$ with *Corr*HR. Predicted rest $\dot{V}O_2$ was set to the rest $\dot{V}O_2$ value measured during the last minute of the step-test resting phase for both raw and corrected HR values whenever they were below step-test rest HR level.

Clothing insulation (Icl) worn by each worker was estimated using ISO 9920:2003 while $\dot{V}O_2max$ was estimated from the *HR*-$\dot{V}O_2$ relationship from the step-test using HRmax = 220 – age.

3.3.4 Statistical Analysis

The $Raw_{HR}\dot{V}O_2$ and $Corr_{HR}\dot{V}O_2$ estimation errors ($Raw_{HR}\dot{V}O_2 - Meas\dot{V}O_2$ and $Corr_{HR}\dot{V}O_2 - Meas\dot{V}O_2$) were compared between the tree planters and the brushcutters groups using a student's t-test. No statistically significant differences were found and therefore data from both groups were pooled for further analysis. Agreement between mean estimated oxygen uptake and mean measured oxygen uptake ($Raw_{HR}\dot{V}O_2 - Meas\dot{V}O_2$ and $Corr_{HR}\dot{V}O_2 - Meas\dot{V}O_2$) was assessed using the limits of agreement (LoA) approach described by Bland and Altman (Bland et Altman, 1999). The assumption of normality of the differences was tested using the Shapiro-Wilks statistic. No departure from normality was detected. A paired sample t-test was conducted to compare the ambient conditions and clothing insulation during the step-test and during actual work in the forest. Pearson's correlation coefficient was also computed for the work phase and rest phase separately to identify relationships between predicted $\dot{V}O_2$ ($Raw_{HR}\dot{V}O_2$ and $Corr_{HR}\dot{V}O_2$) and a number of variables: subject characteristics (age, weight, stature, BMI and $\dot{V}O_2max$), ambient conditions (WBGT), clothing insulation (Icl), physiological responses (*Raw*HR, net cardiac cost — NCC, relative heart rate — RHR, $\dot{V}O_2$ and $\Delta HR_T avg$). Statistical analyses were conducted using JMP version 10 (SAS Institute) and Microsoft Excel. Statistical significance was set at $p < 0.05$. Data are presented as mean ± standard deviation unless otherwise stated.

3.4 Results

3.4.1 Subject characteristics and ambient conditions

Consequent with the age difference, $\dot{V}O_2max$ differed significantly between tree planters and brushcutters (tree planters: 60.1 ± 13.8 ml·kg^{-1}·min^{-1}; brushcutters: 45.5 ± 11.5 ml·kg^{-1}·min^{-1}; p=0.0052). The other subjects' characteristics did not show between-group significant differences. Table 3.1 summarizes the pooled subjects' characteristics (section 2.4).

Table 3.2: Subject characteristics (n=41).

Variable	Measure [a]
Age (yr)	46.3 ± 13.2
Weight (kg)	77.6 ± 10.3
Height (m)	1.75 ± 0.06
BMI[b] (kg·m^{-2})	25.4 ± 3.1
HR_{rest}[c] (bpm)	63 ± 7
$\dot{V}O_2max$[d] (ml·kg^{-1}·min^{-1})	48.0 ± 13.0

[a] Mean ± standard deviation
[b] Body mass index
[c] 1st percentile HR over the workday
[d] Estimated with HRmax = 220 - age

A wide range of ambient conditions were observed (Table 3.2) from: cold to hot (WBGT: 5.9°C to 24.2°C), dry to damp (RH: 35% to 100%), no air movement to windy conditions (Va: 0 to 4.7 m/s). Temperatures were significantly cooler and more humid in the morning during the step-test than during the workday. Tree planters generally wore lighter clothing (short, long underwear and t-shirt) than brushcutters (long sleeves vest and heavy pants). But for a few exceptions workers wore the same clothing during the step-test and during work in the forest.

Table 3.3: Ambient conditions and clothing insulation observed during the step-test and the work period (n=41).

Variable [a]	**Step-test**	**Work period**	**(Step-test – Work)** [b]
Ta (°C)	14.9 ± 5.1 (6.2 - 20)	17.3 ± 5.0 (7.2 - 25.0)	-2.5 ± 5.2 *
Tg (°C)	15.7 ± 5.1 (6.1 - 24.5)	21.8 ± 8.4 (8.4 - 40)	-6.9 ± 7.4 **
RH (%)	74 ± 19 (50 - 100)	69 ± 18 (35 - 97)	5.5 ± 23.2
Va ($m \cdot s^{-1}$)	0.4 ± 0.9 (0 - 4.7)	0.85 ± 1.0 (0 - 4.2)	0.4 ± 0.8 m/s*
WBGT (°C)	13.4 ± 3.7 (5.9 - 18.7)	16.2 ± 4.9 (7.2 - 24.2)	-3.2 ± 4.2 **
Icl (clo)	0.91 ± 0.16 (0.55 – 1.4)	1.11 ± 0.23 (0.6 – 1.7)	-

[a] Ta = dry-bulb temperature; Tg = globe temperature; RH = relative humidity; Va = air velocity; WBGT = Wet-bulb globe temperature; Icl = Clothing insulation
[b] Paired values
* $p < 0.01$
** $p < 0.0001$

3.4.2 Physiological response

Table 3.3 presents the mean physiological responses over the $\dot{V}O_2$ measurement period (all subjects pooled) during the morning step-test, and during work in the forest. Work $Meas\dot{V}O_2$ ranged from 13.8 to 34.1 $ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$ (30% to 64% $\dot{V}O_2max$). At the transition point, the HR elevation due to heat accumulated in the body (i.e., HR thermal component or ΔHR_T) ranged from 3 to 40 bpm with a mean of 21 bpm (see Table 3.3). This elevation represents the maximum HR thermal component reached at the end of the preceding work period. At the start of the work period, the HR thermal component ranged from 0 to 36 bpm and increased from 1 to 19 bpm at a mean rate of 0.27 (± 0.24 sd) bpm/min during work to reach ΔHR_t at the transition point (at the end of the work period). Over the duration of the work period, the heat-induced elevation averaged 17 bpm ($\Delta HR_T avg$: range 0 to 38 bpm). This translates to 27% of the net cardiac cost (NCC) or a 15% increment in RHR due to heat accumulation in the body (RHR_T in Table 3.3). The average HR thermal component ($\Delta HR_T avg$) during work was significantly correlated to indices of strain (*Raw*HR: $r = 0.69$, $p<0.0001$, RHR: $r = 0.73$, $p<0.0001$, and NCC: $r = 0.73$, $p<0.0001$), but not to measured $\dot{V}O_2$ ($Meas\dot{V}O_2$: $r = 0.28$, $p=0.08$) nor to subject's characteristics (results not reported).

The location of the transition point between motor and thermal recovery (i.e., end of motor recovery) was on average 3.86 ± 1.15 min (range: 1 min. to 7 min) from the beginning of the rest pause. From that point on, the thermal recovery decreased at a rate of 0.9 ± 0.6 bpm/min to reach a level between 0 and 33 bpm at the end of the 10-min rest pause. The mean corrected HR during thermal recovery after work in the forest (i.e., from the transition point to the end of the 10-min rest pause) (65 ± 8 bpm, range: 48 – 81) was not statistically different from the step-test rest value (mean bias = -1 ± 3.5 bpm, t_{37} =-1.54, p=0.137). $Meas\dot{V}O_2$ during thermal recovery (5.3 ± 1 $ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$, range: 3.9 – 7.6) was slightly but significantly higher than step-test $\dot{V}O_2$ rest value (mean bias = 0.7 ± 0.7 $ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$, t_{37}=5.46, p<0.0001).

Figure 3-2 shows three examples of physiological responses with different ΔHR_T profiles. The first profile (**A**) displays a low ΔHR_T throughout work in the forest. The second profile (**B**) shows no ΔHR_T at the beginning of a work followed by a marked increase during work. The last profile (**C**) displays a high ΔHR_T value from the outset and maintained throughout of the work period.

Table 3.4: Physiological responses during the morning step-test and work period.

Variable	**Step-test**		**Work**	
	Rest (n=41)	**Highest step (n=41)**	**Rest (n=38)**	**Work (n=41)**
Heart rate				
*Raw*HR (bpm)	67 ± 8 [a] (52 - 85)	120 ± 13 (96 - 147)	90 ± 13 (58 - 114)	123 ± 19 (86 - 175)
Net cardiac cost [b] (NCC) (bpm)	4 ± 4 (0 - 13)	57 ± 10 (39 - 79)	26 ± 9 (8 - 48)	60 ± 17 (27 - 105)
Raw RHR [c] (%)	3 ± 3 (0 – 11)	53 ± 13 (30 – 85)	24 ± 8 (8 – 41)	54 ± 13 (24 – 84)
*Corr*HR (bpm)	-	-	70 ± 7 (52 – 86)	107 ± 14 (81 – 137)
HR thermal component				
ΔHR_T at transition point (bpm)	-	-	21 ± 10 (3 - 40)	-
$\Delta HR_T avg$ [d] (bpm)	-	-	19 ± 9 (0 – 36)	17 ± 9 (0 – 38)
$\Delta HR_T avg$/NCC (%)	-	-	71 ± 16 (22 - 95)	27 ± 12 (0 - 52)
RHR_T [e] (%)	-	-	18 ± 8 (2 - 34)	15 ± 8 (0 - 32)
Reference $\dot{V}O_2$				
$Meas\dot{V}O_2$ (ml·kg^{-1}·min^{-1})	4.8 ± 0.9 (3.3 – 6.9)	25.1 ± 2.5 (18.9 – 30.2)	6.9 ± 1.2 (5.1 - 9.8)	21.1 ± 5.0 (13.8 - 34.1)
$\%\dot{V}O_2max$ [f] (%)	10 ± 2 (6 - 17)	56 ± 14 (28 - 90)	15 ± 3 (8 - 23)	45 ± 9 (28 - 65)
Predicted $\dot{V}O_2$				
$Raw_{HR}\dot{V}O_2$ (ml·kg^{-1}·min^{-1})	-	-	14.2 ± 3.9 (7.5 - 23.3)	27.5 ± 7.4 (15.4 - 45)
$Corr_{HR}\dot{V}O_2$ (ml·kg^{-1}·min^{-1})	-	-	6.9 ± 1.5 (4.4 – 11.2)	20.9 ± 5.1 (13.3 - 31.3)

[a] mean ± standard deviation (range)
[b] HR elevation above rest level ($rawHR - restHR$)
[c] Relative HR NCC / (220 – *age* – *restHR*)
[d] Thermal component averaged over the 10-min seated rest pause or over the work period duration
[e] Percent of thermal component in HR range ΔHR_Tavg / (220 – *age* – *restHR*)
[f] Percent of $\dot{V}O_2max$ ($Meas\dot{V}O_2$ / $\dot{V}O_2max$)

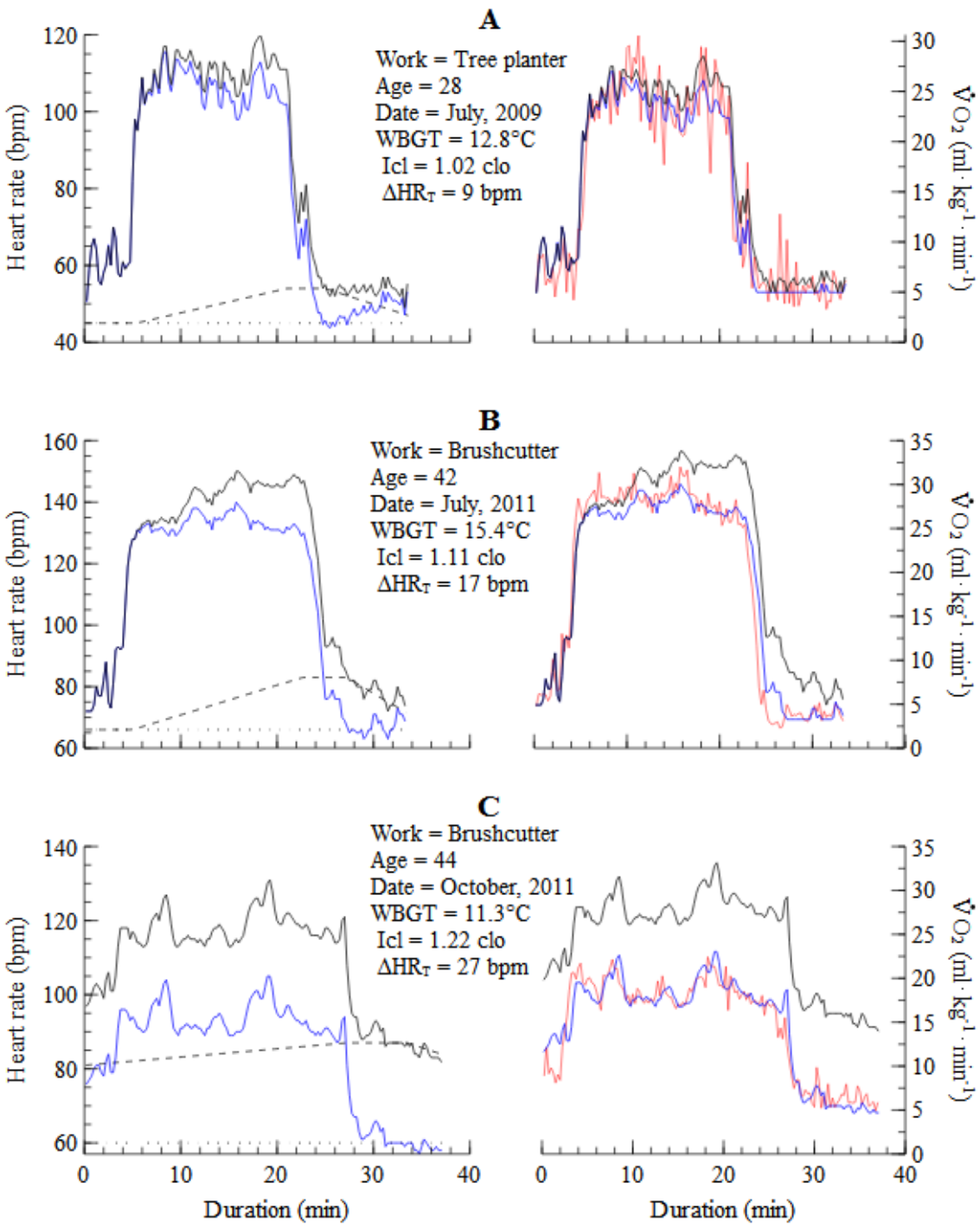

Figure 3-3: Physiological responses from three subjects with different ΔHR_T profiles during work in the forest. On the left: raw HR (dark), corrected HR (blue), HR_T (dashed) and rest HR (dotted). On the right: measured $\dot{V}O_2$ (red) and predicted $\dot{V}O_2$ with raw HR (black) and with corrected HR (blue).

3.4.3 $\dot{V}O_2$ estimation error

Table 3.3 shows that use of HR as measured during work (raw HR or uncorrected HR) to estimate $\dot{V}O_2$ lead to a systematic overestimation: $Raw_{HR}\dot{V}O_2$ was higher than $Meas\dot{V}O_2$ in all 41 subjects. The overestimation ranged from +0.2 ml·kg^{-1}·min^{-1} to +15 ml·kg^{-1}·min^{-1} and was highly significant for both forest work (mean error ± s.d. = 6.4 ± 3.9 ml·kg^{-1}·min^{-1}; t(40)=10.4, p<0.0001) and rest (mean error ± s.d. = 7.3 ± 3.3 ml·kg^{-1}·min^{-1}; t(40)=13.7, p<0.0001). The Bland and Altman analysis (Figure 3-3) showed a highly significant positive correlation in the biases ($Raw_{HR}\dot{V}O_2 - Meas\dot{V}O_2$)(or errors) against individual means for work (r = 0.64, p<0.0001) and rest (r = 0.88, p<0.0001) indicating that the mean bias increases with the magnitude of the measurement. Heteroscedasticity was not significant. A logarithmic transformation to alleviate the linear trend in the bias was not successful since a positive correlation remained in the log-transformed data for work (r = 0.32, p = 0.04) and for rest (r = 0.55, p<0.001). Therefore, for uniformity and ease of interpretation, the mean bias and 95% LoA are presented as a function of the magnitude of the untransformed $\dot{V}O_2$ measurements in Figure 3-3 (see section 3.2 in (Bland et Altman, 1999). The bias was significantly correlated with a number of physiological indices in the work data ($\Delta HR_T avg$: r = 0.83, p< 0.0001; *Raw*HR: r = 0.60, p< 0.0001; NCC: r = 0.64, p< 0.0001; Raw RHR: r = 0.60, p< 0.0001; and $\dot{V}O_2 max$: r = 0.33, p< 0.035) and as well in the rest data ($\Delta HR_T avg$: r = 0.90, p< 0.0001; *Raw*HR: r = 0.76, p< 0.0001; NCC: r = 0.86, p< 0.0001; RHR: r = 0.78, p< 0.0001; but not to $\dot{V}O_2 max$: r = 0.14, p=0.41). The highest correlation found was between the prediction biases and the thermal component at both work and rest. The regression lines are displayed in Figure 3-4 (upper). The similarity in the work and rest regression lines lead us to model the prediction bias by combining the 79 data points using linear mixed model with $\Delta HR_T avg$ as *fixed effect* and subjectID as *random effect*, thus adjusting the estimate parameters for the repeated values of work and rest. The intercept parameter was found not significant (estimate: 0.52, p=0.58) resulting in equation 1 (r^2 = 0.74, RMSE = 1.9 ml·kg^{-1}·min^{-1}). Other variables did not show any significant correlation with the bias for work or rest data (results not reported).

$$mean\ \dot{V}O_2\ estimation\ error = 0.34 \times \Delta HR_t avg \quad (1)$$

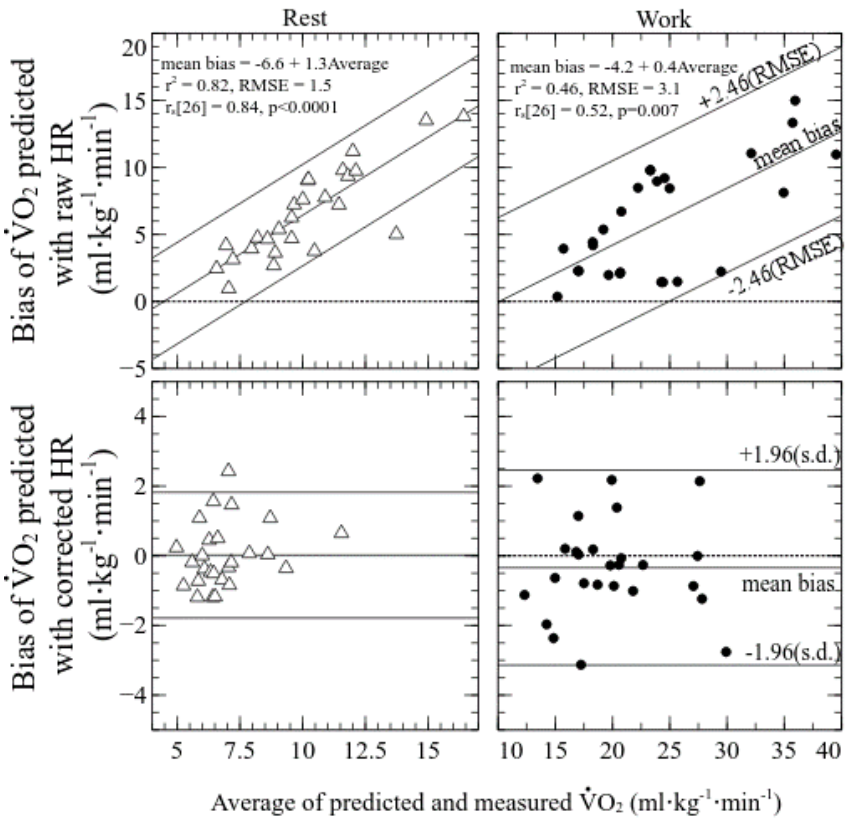

Figure 3-4: Mean bias and 95% LoA between $Meas\dot{V}O_2$ for the work and the rest phases, and $Raw_{HR}\dot{V}O_2$ (top) and $Corr_{HR}\dot{V}O_2$ (bottom).

Using corrected HR in the $HR\text{-}\dot{V}O_2$ relationship yielded a $Corr_{HR}\dot{V}O_2$ value that was not significantly different from $Meas\dot{V}O_2$ for work (mean bias ± s.d. = -0.18 ± 1.65 ml·kg^{-1}·min^{-1}; t(40)= -0.69, p=0.49) nor rest (mean bias ± s.d. = 0.05 ± 0.97 ml·kg^{-1}·min^{-1}; t(37)= 0.38, p=0.71). Correlation between biases and individual means for work and rest were not significant, nor was heteroscedasticity. For the work data, the mean bias was -0.18 ml·kg^{-1}·min^{-1} (95% CI: -0.694 to 0.26 ml·kg^{-1}·min^{-1}) with 95% LoAs of -3.4 (95% CI: -4.3 to -2.5) to 3.1 (95% CI: 2.2 to 3.9) ml·kg^{-1}·min^{-1}. For the rest data, the mean bias was -0.05 ml·kg^{-1}·min^{-1} (95% CI: -0.26 to 0.38) with 95% LoAs of -1.8 (95% CI: -2.4 to -1.3) to 2.0 (95% CI: 1.4 to 2.5) ml·kg^{-1}·min^{-1}. Correlation was not significant between bias and subjects' characteristics, ambient conditions, and physiological responses (results not reported) except during the rest pauses which showed a weak but significant negative correlation between bias and $\Delta HR_T avg$ ($r = -0.46$, p=0.004)(Figure 3-4).

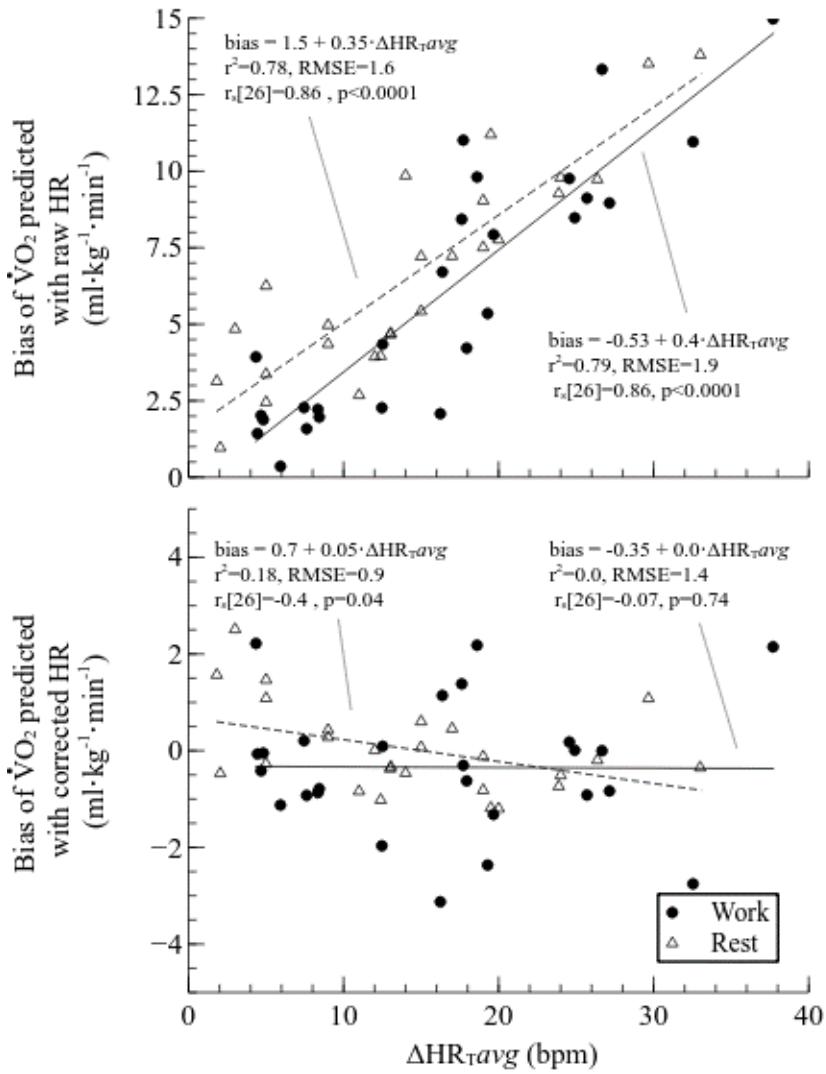

Figure 3-5: Relationship between the biases of $\dot{V}O_2$ predicted with *Raw*HR (top) and with *Corr*HR (bottom), and $\Delta HR_T avg$ for work data (circle) and the rest data (triangle).

3.5 Discussion

The tree planting and brushcutting work observed in this study generated varied levels of exertion (28% to 65% $\dot{V}O_2max$) with an average 21.1 ml·kg^{-1}·min^{-1} that can be categorized as very heavy according to Chengalur et al. (Chengalur *et al.*, 2004). This level of effort is determined by the type of activity performed in combination with widely varying environmental conditions such as sloping terrain, field obstacles, vegetation density, load carried (e.g., brushcutter), and stem diameters to be cut (Toupin, LeBel, Dubeau & Bouthillier, 2007). To protect themselves, workers had to wear clothing ensembles (e.g., rain gear, long sleeves to protect against mosquitoes) and personal protective equipment (safety helmet, multi-ply pants, safety rubber boots, gloves) that increased clothing insulation (up to 1.7 Clo: Table 3.2), thereby degrading the exchange of heat produced by the working muscles with the environment especially in warm to hot ambient conditions. Degraded heat exchanges translate to heat accumulating in the body with a consequent increase in HR (ΔHR_T) over time (Vogt et al. 1970, 1973). The very heavy physical work in combination with the varied ambient conditions and clothing insulation observed in this study lead to HR increases due to heat accumulated in the body (i.e., ΔHR_T or HR thermal component) ranging from 3 to 40 bpm at the end of the work period (i.e., elevation at the transition point in the ensuing seated rest pause) with a 21 bpm average. These figures indicate that many subjects (18 out of 38) had a ΔHR_T at the transition point equal to or beyond the 21 bpm limit proposed by Martinet and Meyer (1999) to protect 95% of the worker population against an increase in body core temperature exceeding 1˚C. These figures also indicate that there were a number of instances (5 out of 38) where the 33 bpm limit proposed by ISO 9886:2004 to protect 50% of the workers was exceeded.

Our results show that equivalent cardiovascular strains can result from two quite different sets of stress conditions as shown by the raw HR measurements (Table 3.3). On average, the highest exertion level of the step-test produced a net cardiac cost of 57 bpm which is marginally lower than the 60 bpm figure measured during work in the forest. However, 27% of the increase of the latter is caused by heat accumulated in the body as a result of thermal stress whereas in the step-test muscle work only is responsible for the increase. Hence, the physical work component of forest work (60 bpm – 17 bpm = 43 bpm) although considered very heavy (Chengalur et al. 2004) is much less demanding from a metabolic heat production point of view than the highest exertion level of

the step-test. This clearly shows that equating raw HR measurements to metabolism can be misleading where thermal stress is present.

During brushcutting and tree planting work, the thermal HR component represented on average 27% (range 0% to 52%) of the HR elevation (NCC) (Table 3.3) yielding a corresponding average 6.4 ml/kg/min $\dot{V}O_2$ overestimation, that is 30% (range 1% to 64%) over the actual work metabolism ($(Raw_{HR}\dot{V}O_2 - Meas\dot{V}O_2)/Meas\dot{V}O_2$). In a study of coal miners Kampmann et al. (2001) reported a 25% $\dot{V}O_2$ overestimation error with thermal HR components ranging from 30% to 50% of HR elevation (NCC) during work. Since these authors did not measure $\dot{V}O_2$ during work, they reported the 25% estimation error with respect to a predicted $\dot{V}O_2$ figure ($(Raw_{HR}\dot{V}O_2 - Corr_{HR}\dot{V}O_2)/Corr_{HR}\dot{V}O_2$). Using the same computation, our results indicate a 32% overestimation error. Our results thus converge with those of Kampmann et al. (2001) and of Nielsen and Meyer (1987) in that the use of raw or uncorrected HR can lead to a substantial work metabolism overestimation. However, our study is the first to report the $\dot{V}O_2$ overestimation error with respect to a measurement of $\dot{V}O_2$ performed during actual work activities where widely varying HR thermal components (ΔHR_T) are present.

The $\dot{V}O_2$ overestimation error increases with the magnitude of the HR thermal component (Figure 3-4 and equation 1) as indicated by the fairly strong correlation between the error (or bias) with raw HR and $\Delta HR_T avg$ (r = 0.9, see Figure 3-4). Equation 1 shows that the average error was 0.34 ml/kg/min for each 1 bpm elevation of HR due to heat accumulation. This result highlights the importance to take into account ΔHR_T when $\dot{V}O_2$ is to be estimated from HR data. For instance, with no more than 5 bpm ΔHR_T the expected group mean bias (95% CI) will be larger than the largest expected bias for a single individual (upper bound of LoA) when using corrected HR. Such a small ΔHR_T would yield a 15% overestimation of actual work $\dot{V}O_2$. Overestimating $\dot{V}O_2$ in thermal stress indices (ex., PHS, WBGT) may be seen as a positive consequence in that it overestimates heat produced by the body during work and thus provides workers with better protection. But, a large estimation error may lead to the prescription of work-rest regimens that are judged as too conservative and unproductive by workers and employers alike, and in the end may not be applied. That would be equivalent to not taking into account heat stress and putting workers at risk.

The use of Vogt et al.'s (1970, 1973) method enabled an accurate estimation of ΔHR_T in tree planting and in brushcutting work, thereby allowing an accurate estimation of the HR elevation related to the physical work only (ΔHR_W), that is the HR component directly related to work metabolism. This was shown by the lack of correlation between bias and corrected HR or measured $\dot{V}O_2$ (Figure 3-4) and as well by the lack of statistically significant difference between $Meas\dot{V}O_2$ and $Corr_{HR}\dot{V}O_2$ in both work and rest data. ISO 8996 (ISO 8996:2004) suggests a ±10% error in the estimation of work $\dot{V}O_2$ from HR data in the absence of thermal stress, but the standard does not specify whether this error applies to an estimation for a group of workers (i.e., error of the group mean) or for a single subject. Our results show a group mean work $\dot{V}O_2$ estimation error of -0.18 ml/kg/min (less than 1% of actual $\dot{V}O_2$), that is almost an order of magnitude smaller than the 10% suggested by the ISO standard, indicating a very good accuracy of the method at the group level. The limits of agreement (LoA) indicate that work $\dot{V}O_2$ estimation error for a single subject can reach a maximum of -3.4 to 3.1 ml/kg/min (-16% to 15% of actual $\dot{V}O_2$). With two subjects, the mean error decreases to -11% to 10% which is in line with the 10% suggested by ISO 8996 (2004). These error figures show Vogt et al.'s (1970, 1973) method to produce precise estimations at the group level and subject level. The estimation errors are well below the magnitudes normally associated with physiological studies where LoAs of up to 30% are considered acceptable given the inter-subject variability of measurements made on human subjects (Critchley et Critchley, 1999).

Our results indicate that the transition point between metabolic recuperation and thermal recuperation was at 3.86 min on average after work stoppage, but it could be as far as 7 min. This former is very close to the average 4 min proposed by Vogt et al. (1973) and Mairiaux and Malchaire (1990). Hence, a 10-min rest pause as proposed by Vogt et al. (1973) will allow the practitioner not to miss the transition point and will likely allow the subject to lose part of his accumulated body heat before resuming work. Such a long pause will also help the practitioner to determine the point on the HR profile where to start the linear increase of ΔHR_T for the ensuing work period. The practitioner who is interested in the ΔHR_T profile over the work day will have to plan for a number of pauses distributed throughout the day (e.g., as was done in this study). A requirement for the application of Vogt et al.'s method is that the rest pause be taken in a neutral environment. This requirement could not be met in this study since facilities offering neutral

climatic conditions were not available in the forest. Also, the workers were paid on an incentive basis such that rest pauses had to be taken very close to the work site so as not to degrade their productivity. In this study, the use of an umbrella to protect the workers from the sun during the rest pause seems to have produced conditions that although not neutral were suitable enough to clearly pinpoint the transition point between motor and thermal recovery. In future work, it would be worth investigating more in depth the impact of ambient conditions on motor and thermal recovery.

The literature on physical work capacity assessment recommends that submaximal exercise tests be performed under laboratory conditions with the subject wearing light clothing (neutral ambient conditions, t-shirt, shorts and running shoes). In this study, the step-test was administered near the work site with the worker wearing his normal work clothes. This could have affected the subjects' HR-$\dot{V}O_2$ relationships and possibly contributed to increasing estimation errors. However, from the practitioner's point of view it is reassuring to know that such a deviation from the recommended testing conditions, which is often the case in practice, can produce a mean estimation error at group level below 1% (95%CI: -3% to +1%), that is well below the ±5% $\dot{V}O_2$ measurement error indicated by ISO 8996 (2004).

One limitation of this study pertains to other variables that could yield a HR elevation without a subsequent increase in metabolism but that were not specifically addressed in our experimental setting (e.g., size of working muscle groups, static work components, steady or non-steady-state work, mental stress and dehydration). However, according to ISO 9886 (2004) and Meyer et al. (2001) the effect of stress (ΔHR_N), dehydration, and muscle static work (ΔHR_S) cannot be quantified by Vogt et al.'s (1973) method. In this study, these factors likely had a negligible effect on HR elevation. For one, psychological stress was unlikely since the subjects performed their daily work in the usual conditions and they were accustomed to the presence of researchers and to participating in field research. A number of authors have indicated that forest workers are often in a state of dehydration despite the fact that they can self-hydrate at will mainly because of the important sweat loss produced by a combination of high work intensity, ambient conditions and clothing insulation (Bates, Parker, Ashby & Bentley, 2001; Trites, Robinson & Banister, 1993). In this study, dehydration has not been measured nor controlled, but an important sweat loss could certainly be observed in a number of subjects. Hence, it is possible that dehydration may have

contributed to the HR elevation in this study. But given the small $\dot{V}O_2$ estimation errors at group level either the effect of dehydration was small if Vogt et al.'s (1973) method cannot account for it, or it was included in the HR elevation if the method actually takes it into account contrary to what Meyer et al. (2001) suggest. In future research, it would be interesting to exert a better control on dehydration and better characterize its effect with respect to Vogt et al.' (1970, 1973) method. From a practitioner's point of view, this study shows that the method offers very good accuracy in conditions where subjects can drink at will and with the possibly that they can be partially dehydrated. Static muscular work usually has a marginal to negligible contribution to the elevation of HR in the presence of significant whole body dynamic muscular work (Nielsen & Meyer, 1987), which was the case in this study. As for other factors such as working muscle groups and steady vs non-steady state physical work, they were fairly constant throughout the study and were typical of tree planting and brushcutting activities. Hence, our results should be applicable to other comparable types of physical activities.

3.6 Conclusion

This study showed a practical application of Vogt et al.'s (1970, 1973) method in combination with individual's HR-$\dot{V}O_2$ relationships established with a simple submaximal step-test to estimate oxygen consumption ($\dot{V}O_2$) from heart rate (HR) measurements performed during tree planting and brushcutting work. A wide range of exertion levels and heat stress were observed. Results showed a mean 30% $\dot{V}O_2$ overestimation error when using measured HR (raw) to estimate work $\dot{V}O_2$. On the other hand, using HR corrected with Vogt et al.'s method to remove the HR thermal component yielded a mean estimation error below 1% in the subject group. These results highlight the importance of accurately assessing the HR thermal component when assessing $\dot{V}O_2$ from HR data. Results did not seem affected by the fact that the step-test was administered at the work site before the beginning of the work day with the worker wearing his work clothes (deviation from controlled conditions) nor by the fact that the 10-min rest pauses were not taken in a neutral environment (a deviation with respect to Vogt et al.'s method). From the practitioners point of view, this study shows that $\dot{V}O_2$ can be estimated accurately in work settings where heat stress is present using a HR monitor and inexpensive equipment (step-test bench, metronome, chair and umbrella to protect from the sun).

3.7 Acknowledgements

The authors wish to thank Isabelle Auger for her contribution to the research design and guidance in the statistical analyses as well as Steve Lemay, Adam Page, Dr. Yeni Arias, Dr. Laurent Giraud, Bastien Thibodeau, Marie-Ève Pelchat and Merieme Kerchi for the data collection and preparation. The authors also wish to thank Dr. Mario Leone for his technical advice with oxygen consumption measurement with the k4b2. The authors are grateful to the Association des entrepreneurs forestiers du Québec, the Fédération Québécoise des cooperatives forestières and the Regroupement des sociétés d'aménagement forestier du Québec for their help in recruiting silvicultural entreprises to participate in this study.

This project was funded jointly by Natural Science and Engineering Research Council of Canada (NSERC) through the Chaire de recherche du Canada en ergonomie of Polytechnique Montréal and the Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, and the Fonds de recherche du Québec — Nature et technologies.

CHAPTER 4 : ARTICLE 2 : PREDICTION OF WORK METABOLISM FROM HEART RATE MEASUREMENTS IN FOREST WORK: SOME PRACTICAL METHODOLOGICAL ISSUES

Philippe-Antoine Dubé [a*], Daniel Imbeau [a], Denise Dubeau [b], Isabelle Auger [b], Mario Leone [c]

[a] Department of Industrial Engineering and Mathematics, Polytechnique Montréal, Montréal, Canada; Address: C.P. 6079, Succursale Centre-Ville, Montréal (Québec), Canada, H3C 3A7

[b] Direction de la recherche forestière, Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Québec, Canada; Address: 2700, rue Einstein, Québec (Québec), Canada, G1P 3W8

[c] Département des Sciences de la santé, Université du Québec à Chicoutimi, Québec, Canada; Address : 555, Boulevard de l'Université, Chicoutimi (Québec), Canada, G7H 2B1

** Corresponding author*

Address: C.P. 6079, Succursale Centre-Ville, Montréal (Québec), Canada, H3C 3A7

E-mail address: philippe-antoine.dube@polymtl.ca

Article soumis pour publication dans le journal *Ergonomics* le 18 novembre 2014.

4.1 Abstract

Individual subject heart rate (HR) to workload relationships were determined through 93 submaximal step-tests administered to 26 healthy subjects attending physical activities in a University training center (Laboratory study) and 41 experienced forest workers (Field study). Maximum aerobic capacity (MAC) predicted with each subject's relationship was compared to measured MAC from a maximal treadmill test (Laboratory study) to test the effect of two age-predicted maximum HR equations (220-age and 207-0.7×age) and two clothing insulation levels (0.4 and 0.91 clo) during the step-test. Work metabolism (WM) estimated from forest work HR was compared against concurrent work $\dot{V}O_2$ measurements while taking into account the HR thermal component. Results show that MAC and WM can be accurately predicted (1% mean prediction bias with ±25% 95%LoA) from work HR measurements and simple regression models developed in this study. Clothing insulation had no impact on predicted MAC nor age-predicted maximum HR equations.

Practitioner summary: This study sheds light on four methodological questions faced by practitioners regarding the administration of a submaximal step-test to assess maximum aerobic capacity, and the accuracy of using the step-test heart rate to workload relationship to predict work metabolism from heart rate data collected during actual work.

Keywords: heart rate, work metabolism, prediction bias, submaximal step-test, maximum aerobic capacity

4.2 Introduction

Work metabolism (WM) and maximal aerobic capacity (MAC) are parameters commonly assessed by the ergonomics practitioner when evaluating the physical demands of work. WM informs on the energy requirement or workload of work activities, an information required in many work design models or to evaluate health and safety risks (e.g., task intensity categorization, number and length of rest pauses, work cycle and shift durations, thermal comfort and stress indices, or to establish a threshold of fitness needed for a return to work) (Chengalur, et al., 2004; Bouchard & Trudeau, 2008). MAC provides valuable information on the capacity of the workforce to perform those tasks and is helpful when interpreting risk assessment. WM can be accurately assessed by oxygen consumption ($\dot{V}O_2$) measurement (ISO 8996:2004). However, in field settings $\dot{V}O_2$ measurement is often impracticable enough that WM has traditionally been assessed by heart rate (HR) measurements, as it is relatively easy, reliable, unobtrusive and cost-effective to monitor in an actual work environment (Rodahl, 2003; Chengalur *et al.*, 2004; Louhevaara & Kilbom, 2005). Work HR measurements can be converted to equivalent $\dot{V}O_2$ figures using published relationship between HR and $\dot{V}O_2$ (e.g., ISO 8996:2004), or preferably one determined individually through a standardized exertion test as the relationship depends greatly on the subject's MAC (Louhevaara & Kilbom, 2005). By extrapolation of the HR-$\dot{V}O_2$ relationship, a worker's MAC can be estimated with his age-predicted maximal HR. Determination of an individual's HR-$\dot{V}O_2$ relationship is usually obtained through submaximal exercise testing using either a treadmill, a bicycle ergometer or a bench step-test. The latter being more compact and portable is often preferred when tests are administered in workplace environments (Rodahl, 2003).

Meyer and Flenghi (1995) proposed a bench-stepping, 5-stage test, designed to be simple and easy to administer at the workplace with workers of unknown health and physical condition. The Meyer and Flenghi step-test (MF step-test) is different from other step-tests on a number of aspects (e.g. Astrand cycle test, Chester step-test, ACSM stair-stepping equation). Its protocol uses height increments instead of stepping rate increments to produce different exertion levels. The stepping rate is maintained constant at 15 steps/min, making it easy for workers to keep pace at all step heights, thus yielding superior overall test precision and robustness. It does not require attaining the 85% of maximal HR exertion level as most step-tests do. The relatively low physical loads produced during the step-test (30% to 60% HRmax at the highest step height) and the short duration

of the test make it less demanding and does not overly burden the subject before his or her workday. Imbeau et al. (2010) reported that the HR exertion levels elicited by the MF step-test at Stages 4 and 5 were comparable to those measured in forest work (regeneration release and tree planting). In addition, Meyer and Flenghi (1995) provided an equation to estimate the oxygen uptake (in ml/kg/min) at each stage, which alleviates the need to use an expensive piece of equipment to measure this variable. The MF step-test was developed in laboratory conditions with young male and female subjects in their twenties wearing light sports clothes. Despite the fact that the test was designed to assess MAC, it was never validated against a maximal test in which $\dot{V}O_2$ is measured. One could, therefore, be concerned about the ability of the step-test to accurately predict MAC.

Conducting a submaximal exercise test in the workplace may appear challenging to some practitioners since meeting a number of requirements is usually recommended: the test should be conducted in a neutral environment, at least 2 hours after a meal (preferably after a 12h fast), the subject should be wearing light clothing for the test, and the step-test should be conducted in the morning when the procedure involves measuring basal or resting metabolic rate (Shephard, 1978; McCrory, Molé, Nommsen-Rivers & Dewey, 1997; Louhevaara & Kilbom, 2005). Departure from such requirements may affect the slope of the HR-$\dot{V}O_2$ relationship and thus increase estimation error of both MAC and WM. In many actual work environments, such requirements are difficult to meet. For instance, time constraints often prevent the practitioner from waiting hours after the meal to conduct a submaximal test without impeding on the workers' normal work schedule. In forest work, the work environment is often remote and the work site locations change constantly such that proper infrastructures required to conduct submaximal testing are rarely available. A practical approach is for the test to take place near the work site the same day as the field HR measurements are planned. This way, the subject is instrumented only once (for the test and field measurements). In forest work this frequently means testing outdoors. In such conditions, it is very difficult and often not realistic to ask a worker to change clothes for the purpose of a submaximal test, especially in the early morning cool conditions with mosquitoes. The worker will often accept to participate as long as he or she considers the testing procedure not too demanding, meaning that he or she may wear his or her normal work clothes and that the test be quick enough that little or no pay is lost. Literature on thermal stress shows that the clothing ensemble worn can contribute to increase HR during physical activity performed in a warm to hot environment (ISO 8996, 2004; ISO 7933, 2004; Vogt et al., 1970, 1973). Hence, one may wonder whether wearing normal work

clothes during a step-test will affect significantly the outcome of a submaximal step-test. The practitioner forced to parsimony, efficiency, and reasonable costs of conducting his study may wonder how deviating from recommended submaximal testing requirements may affect a subject's HR-$\dot{V}O_2$ relationship and hence the estimations gathered from it.

The purpose of this paper is to shed light on four methodological issues faced by the practitioner in the determination of a subject's HR-$\dot{V}O_2$ relationship through a submaximal step-test conducted in other than laboratory conditions, and in the use of this relationship to asses MAC, and WM from field HR measurements: 1) when determining a subject's HR-$\dot{V}O_2$ relationship through a step-test, what is the loss of accuracy in MAC and WM when using an equation predicting step-test $\dot{V}O_2$ values vs $\dot{V}O_2$ measurements during the step-test? 2) is the HR-$\dot{V}O_2$ relationship affected by wearing normal work clothes (vs light clothes) during a step-test? 3) if so, should the consequent HR increase be removed from the step-test data to improve MAC and WM assessments? 4) does the HR max prediction equation used affects the MAC estimate? This study is based on a laboratory study as well as on a number of data collections performed during actual forest work (regeneration release and tree planting work) over 3 seasons in the Province of Québec.

4.3 Methods

Two distinct datasets were used. The first one is from the laboratory study where a group of subjects performed three physical activity tests: two MF step-tests and one maximal treadmill test. The effect of wearing different clothing insulations during the step-test on its ability to estimate treadmill MAC was tested. The second dataset was assembled from studies of forest workers carrying their normal work activities where $\dot{V}O_2$ and HR measurements were conducted during a morning step-test and over the course of the day. This dataset provided a “worst case scenario” in that the morning step-test was conducted in other than laboratory/training center conditions.

4.3.1 Laboratory study

4.3.1.1 Participants

26 male subjects aged 21 to 46 years completed one MF step-test wearing a running clothing ensemble (*light clothing*), another one wearing a “work” clothing ensemble (*work clothing*) and a maximal treadmill test with the running clothing ensemble. Subjects were all volunteers drawn

either from clients attending physical activities at the University of Montreal sport center facilities or from the local population through advertisement. All subjects were non-smokers. None was taking medications of any forms at the time of the study. All confirmed their aptitude to physical activity (Par-Q, (Thomas, Reading & Shephard, 1992), and signed an informed consent. Because subjects had to perform a maximal test, age was limited to 50 years to comply with Polytechnique Montreal's and University of Montreal's ethics requirements for research with human subjects.

4.3.1.2 Clothing ensembles

All subjects were provided with the same clothing ensembles. The *light clothing* ensemble consisted of a standard T-shirt (#30) and sport short (#1 and #99), a pair of crew socks (#264) and a pair of running shoe (#262), that provided a combined 0.22 clo static insulation according to table B.2 of (ISO 9220:2007). The *work clothing* ensemble consisted of the *light clothing* ensemble, a coverall (#112) and a pair of overtrousers (#196) that provided a combined 0.91 clo static insulation.

4.3.1.3 Physical activity tests

Physical activity tests were conducted at the kinesiology laboratory of the University of Montreal, Canada. Each subject was met once at the laboratory and performed the three tests the same day with rest periods of at least 30 min between tests or until HR had recovered to resting values. The administration order of the two step-tests (*light* and *work clothing*) was counterbalanced among subjects. The treadmill maximal test was always performed last. Conducting all tests the same day was purposely chosen to reduce test-retest variability and avoid subject attrition. Day-to-day variability, particularly in HR measurements, may contribute to increase MAC and WM estimation variability (McCrory *et al.*, 1997; McArdle *et al.*, 2006) which could have clouded the effect of clothing insulation when tests are performed on separate occasions. It was hypothesized that performing the step-tests concurrently would have a lesser day-to-day impact on HR and $\dot{V}O_2$ measurements and no impact on the treadmill MAC assessment considering the relatively low total physical exertion of the MF step-test. Subjects were asked not to drink any kind of beverage besides water or juice the day of the tests and to refrain from eating for at least 2 hours before meeting at the laboratory. They were also requested not to participate in strenuous exercise the day before.

4.3.1.4 Apparatus

HR and $\dot{V}O_2$ were recorded continuously during all tests using an automated metabolic cart (MOXUS Metabolic System, AEI Technologies, Naperville, IL, USA) and a Polar transmitter belt (T-61 coded, Polar electro, Finland), and were averaged at 30-sec intervals. The metabolic cart's sensors were calibrated according to manufacturer's recommendations before each test with reference gas (15% O_2 and 5% CO_2) and ambient air. The flowmeter was calibrated with a motorized syringe (Vacu-Med, Ventura, CA, USA) by an experienced technician. Recovery heart rate during rest periods between tests was monitored with a Polar heart rate monitor (S810i, Polar electro, Finland) so as to assess complete recovery between tests.

4.3.1.5 Step-test protocol

Meyer and Flenghi's (1995) step-test protocol was followed. In the first stage (Stage 1) the subject was seated on the bench for at least 5 min and resting quietly while his resting HR and basal $\dot{V}O_2$ were measured. The subject then stood up and rested standing for 2 min to allow HR to stabilize. Meanwhile, the height of the step was adjusted to the first and lowest level (11.5 cm from the floor, Stage 2). The subject then stepped onto and off the bench, one foot at a time, for 3 min at a stepping rate of 15 steps/min, or 1 second per footstep. A metronome set at 60 bpm was used to mark the tempo. The subject then stood in front of the bench for 30 sec to allow the researcher to adjust the step height at the next higher level (21.5 cm from the floor: Stage 3). This cycle was repeated for the two remaining stages (31.5 cm: Stage 4 and 41.5 cm: Stage 5). At the end of Stage 5, the subject sat quietly on the bench until HR had recovered to pre-test level.

4.3.1.6 Treadmill test protocol

The maximal test was conducted on a motorized treadmill (Quinton, Bothell, WA, USA) using an adaptation of the Léger and Boucher continuous multistage run test protocol (Léger & Boucher, 1980). This testing procedure is highly standardized and largely used in physical clinics and sports centers in Canada. The test began with a 5 min warm-up to allow the subject to familiarize with the equipment and was followed by a brief rest. The starting speed was set between 8 and 10 km/h. The speed was then incremented by 1 km/h every 2 min until the subject's maximal speed was reached, and then maintained until exhaustion. $\dot{V}O_2max$ was determined as valid if a plateau was observed in the displayed 30-sec mean $\dot{V}O_2$ values during the test despite an increase in running

velocity, which occurred in 58% of the subjects. In the absence of a plateau (42%), $\dot{V}O_2max$ was considered valid if respiratory quotient was higher than 1.10 and HRmax was within 10 bpm of the subject's age-predicted maximal heart rate (220-age).

4.3.2 Field study

4.3.2.1 Participants

50 male volunteer forest workers with at least three years of experience in performing mechanical regeneration release and/or tree planting work participated in this study. Nine were smokers. All subjects completed a Physical Activity Readiness Questionnaire (PAR-Q) and signed an informed consent to participate in the study.

4.3.2.2 Measures and apparatus

Workers were met in the morning at their workplace—that is, at the forest camp where they lodged for most (n=42), or on the side of the road near their day's worksite for others (n=8)—to conduct a MF step-test with the subject wearing his regular work clothes. HR and $\dot{V}O_2$ were recorded during the test. Most step-tests took place outdoors (n=35). After the step-test, workers were released and started performing their actual work for the day. A researcher followed each worker to gather a complete record of the subject's activities and their durations during the day. HR was recorded throughout the day at 5-sec intervals using a heart rate monitor (RS800, Polar Electro., Finland). Four 10-min seated rest periods were imposed during the workday (middle AM, before lunch break, middle PM, end of workday) to assess the HR thermal component per Vogt et al.'s method (1970, 1973). The 10-min rest periods were taken at the worksite, immediately after a physically demanding work period; a portable chair with a hood was carried by the researcher for this purpose. Over the course of the workday $\dot{V}O_2$ was measured using either of two portable gas analysers (a Fitmate Pro in 35 subjects and a K4b^2 in 15 subjects; COSMED, Rome, Italy) during a work bout (duration ranging from 9 to 74 min with a 34 min average and 11 min SD) followed by a 10-min rest break. The same $\dot{V}O_2$ measuring apparatus was used during the morning step-test and the work bout. Ambient conditions (dry bulb temperature - Ta, globe temperature - Tg, air velocity - Va, relative humidity - RH, and atmospheric pressure) were measured during the step- test and recorded throughout the day at 5 s intervals at the work site as close to the worker as possible using a tripod-mounted Kestrel® 4000 weather meter (Nielsen-Kellerman Co., Boothwin, PA) equipped with a

vane and globe thermometer. Clothing insulation of every worker was assessed per ISO 9920:2007 at the time of the step-test and during the work bout. A fuller description of the subjects, apparatus and procedure can be found in Dubé et al. (2014).[1]

4.3.3 Data preparation and processing

4.3.3.1 Field study data preparation

HR and breath-by-breath $\dot{V}O_2$ data collected in the field study were examined to detect missing or aberrant data points. Aberrant data points such as a sudden peak in the HR or $\dot{V}O_2$ profile due to a subject's movement interfering with equipment or coughing or swallowing in the gas analyzer's mask were marked as missing. N=9 subjects were removed from the dataset due to missing or aberrant data points accounting for more than 10% of the measurement period (step-test or field data collection) or for more than one consecutive minute. In other cases occasional missing or aberrant HR were replaced by averaging surroundings valid values. Breath-by-breath data were further smoothed using 7 points centered average (Lamarra et al., 1987) and averaged at 30-sec intervals using the manufacturer's software program provided for each apparatus. The final dataset included 41 measurements from 7 tree planters and 34 brushcutters.

4.3.3.2 HR thermal component removal

HR profiles from all step-tests (laboratory and field) and from forest work measurements were corrected to remove the thermal component (ΔHR_T) using the procedure outlined by (ISO 9886:2004)) and following recommendations from (Mairiaux et Malchaire, 1990), yielding corrected HR profiles. According to these authors the HR profile includes three main components: resting heart rate (ΔHR_{rest}), the motor component attributable to muscle activity associated with physical work (ΔHR_M) and the thermal component attributable to body heat accumulated during work (ΔHR_T). Other components are considered negligible (i.e. circadian rhythm, mental stress, etc.; see (ISO 9886:2004). Figure 4-1 shows an example of the determination of ΔHR_T and the resulting corrected HR profile for a subject's step-test HR data. In this procedure, ΔHR_T is

[1] cf. Chapitre 3, section 3.3

determined graphically by the HR profile; the HR elevation above rest at the fourth minute after the beginning of a seated rest break (3 in Figure 4-1) corresponds to ΔHR_T at the end of the work period (2 in Figure 4-1). That component is thought to increase linearly between the beginning and the end of the physical activity period (1 to 2 in Figure 4-1) while it decreases during recovery (point 3 to 4 in Figure 4-1). For the subject in Figure 4-1 ΔHR_T was observed during the first step-test (*work clothing*) but not during the second test (*light clothing*). A complete description of the ΔHR_T removal process can be found in Dubé et al. (submitted)[2] and original work from Vogt et al. (1970, 1973).

[2] cf. Chapitre 3, section 3.3.3

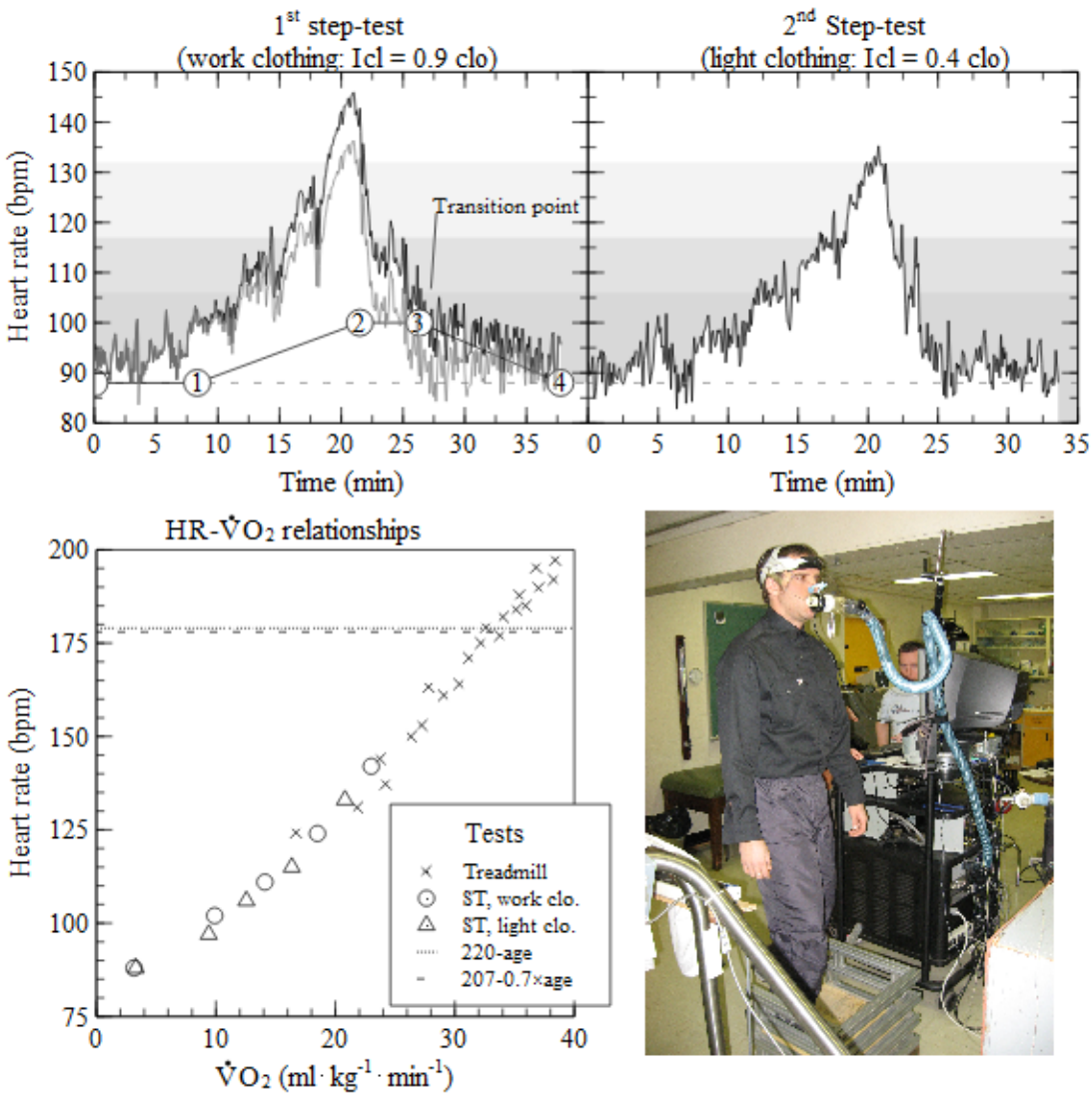

Figure 4-6: Example of step-tests results for a subject in the laboratory study. Upper part: HR profiles for the two step-tests (raw HR in black solid line, corrected HR in grey solid line and resting HR in dashed line): with *work clothing* on the left and *light clothing* on the right. Lower left: HR-$\dot{V}O_2$ data points for the two MF step-tests and from the treadmill test.

4.3.3.3 HR-$\dot{V}O_2$ relationships

For each step-test the average of the two lowest 30-sec HR and $\dot{V}O_2$ values during the seated rest period (Stage 1) and the average HR over the last min of exertion of Stages 2 to 5 were computed. Predicted Stage-$\dot{V}O_2$ values for each of the five stages were then computed using the Stage-$\dot{V}O_2$

equation provided by Meyer and Flenghi (1995). Hence, for each step-test, four HR-$\dot{V}O_2$ relationships (R1, R2, R3, R4) were built using either stage-measured or stage-predicted $\dot{V}O_2$ values, and combining with either raw (measured) HR or corrected HR (i.e., ΔHR_T removed, section 2.3.2) (Table 4.1). Two more relationships (R5 and R6) were built from Stage-$\dot{V}O_2$ data from all 93 step-test conducted in this study (Table 4.1). Using the HR-$\dot{V}O_2$ relationships R1 to R6, six MAC predictions were computed by extrapolation to the subject's age-predicted maximum HR using two equations: the commonly used 220-age and (Gellish *et al.*, 2007) 207-0.7×age.

Table 4.5: HR-$\dot{V}O_2$ relationships built from step-test stage-HR (raw and ΔHR_T corrected) and stage-$\dot{V}O_2$ (measured and estimated).

Relationship	**Step-tests HR**	**Step-tests $\dot{V}O_2$**
R1	raw	measured
R2	ΔHR_T corrected	measured
R3	raw	estimated with Meyer and Flenghi's equation
R4	ΔHR_T corrected	estimated with Meyer and Flenghi's equation
R5	raw	estimated with equation fitted to 93 step-test data
R6	ΔHR_T corrected	estimated with equation fitted to 93 step-test data

4.3.4 Statistical analyses

The clothing and step-test period effects on raw HR, corrected HR and $\dot{V}O_2$ measures of the laboratory study data were tested with a four-factor ANOVA: stages (1 to 5), clothing (work, light), test period (1st , 2nd) and test sequence (work-light, light-work). The ANOVA was performed using a mixed model to take into account the dependent nature of the crossover trials (test sequence) and the repeated measurements from the 5 stages of each subject. Post hoc analyses using dependent t tests were performed where appropriate, adjusting the p-value for multiplicity (adjust=simulate in SAS proc mixed) to protect against type I error. The difference between a factor's levels is reported as as bias ± 95%LoA.

Work clothing step-test Stage-$\dot{V}O_2$ measures were tested for an apparatus effect (Moxus, Fitmate Pro, K4b^2) with an ANOVA with repeated measurements (5 stages). A significant overestimation

by the K4b2 was found for stages 2 to 5 (see Figure 4-2 and section 3.1.2). Overestimation by the K4b^2 at submaximal workload has been reported in a number of studies (Duffield, Dawson, Pinnington & Wong, 2004; L R Mc Naughton, 2005; McLaughlin et al., 2001). Duffield et al.'s (2004) equation (1) to adjust $\dot{V}O_2$ measurements from the K4b^2 to equivalence with a metabolic cart was used on the K4b^2 data for stages 2 to 5. Fitmate Pro data also showed a consistent 1 ml/kg/min overestimation vs the Moxus cart data with *work clothing* for stages 2 to 5 and consequently Fitmate Pro $\dot{V}O_2$ data was adjusted by subtracting 1. The same ANOVA was conducted on the adjusted measures.

$$\dot{V}O_{2_{cart}}(L \cdot min^{-1}) = 0.926 \times \dot{V}O_{2_{K4b^2}} - 0.227 \qquad (1)$$

The Meyer and Flenghi's Stage-$\dot{V}O_2$ equation parameters (Table 4.4) were reevaluated through linear mixed models analysis using $\dot{V}O_2$ measures of all 93 step-tests conducted (Moxus, K4b2 adjusted and FitmatePro adjusted). The fitted model parameters were used to build the R5 and R6 HR-$\dot{V}O_2$ relationships (Table 4.1).

The clothing, test period, test sequence, age-predicted maximum HR equation, and HR-$\dot{V}O_2$ relationship (R1-R6) main effects and their second order interactions were analysed using a 5-way ANOVA on MAC prediction bias (predicted – treadmill measured). The ANOVA was also performed using mixed models to take into account correlations introduced by the 6 relationships, and 2 age-predicted maximum HR equations per subject. Concordance of treadmill measured vs predicted MAC was assessed using Pearson's r correlation coefficient while agreement was assessed using limits of agreement analysis (LoA) as described by Bland-Altman (Bland & Altman, 1986, 1995, 1999). Prediction bias was calculated as the mean difference between measured and predicted MAC and 95% limits of agreement (LoA) as ± 2×standard deviation (SD) of the differences. 95%LoA were computed on differences (in ml/kg/min) and relative differences (as a % of average of estimated and measured), since heteroskedastic errors are the common with physiological parameters (Nevill & Atkinson, 1997; Dewitte, Fierens, Stöckl & Thienpont, 2002). Post hoc analysis using dependent t-tests was used to determine if mean bias significantly departed from 0. A similar statistical analysis process was applied to the field study data, that is, in the comparisons of the forest work $\dot{V}O_2$ (WM) estimations using the 6 HR-$\dot{V}O_2$ against field measured $\dot{V}O_2$.

Normality of the differences was assessed visually with a histogram and computationally with a Shapiro-Wilk test. Heteroskedasticity, that is, non-constant bias or non-constant variance over the range of measurements, was assessed using Pearson's r correlation coefficient on biases against averages and on absolute residuals against averages (Nevill & Atkinson, 1997; Bland & Altman, 1999; Dewitte *et al.*, 2002). Degrees of freedom were computed using the Kenward-Rodger method for small sample sizes (Bell, Morgan, Schoeneberger, Kromrey & Ferron, 2014). Statistical significance level α=0.05 was used for all tests. ANOVA analyses were carried out with SAS University Edition (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA). Limits of agreement were computed using Microsoft Excel. Pearson r correlation coefficients and descriptive statistic were computed with SAS JMP version 10 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA).

4.4 Results

4.4.1 Step-test data analyses

Subject characteristics, clothing insulation and ambient conditions during all step-tests for three groups of subjects (groups 1 to 3) are summarized in Table 4.2. Corresponding information from the Meyer and Flenghi (1995) paper is also presented as Group 0 to allow comparison. Forest workers (field study: group 2 and 3) experienced widely varying thermal conditions compared to Meyer and Flenghi's (1995) and our Laboratory study subjects (group 1). The latter were significantly younger than forest workers ($F_{1, 53}$=11.16, p = 0.0015), while subject stature, weight and BMI were comparable in both studies (p>0.2). Clothing insulation in the field study ranged from 0.55 to 1.39 clo, but the group average (0.93 clo) turned out to be very close to the value used in the Laboratory study step-test with *work clothing* (0.9 clo). The clothing insulation during the work bout in the field study (mean±sd = 1.11±0.23, range: 0.6 to 1.7 clo) was slightly higher than in the Laboratory *work clothing* condition and ranged more widely. The ambient conditions during the work bout were slightly warmer than during the outdoors morning step-test and cooler than during the indoors and laboratory step-tests.

Table 4.6: Description of subjects characteristics and ambient conditions during the step-test per subject group.

Variable	Data from Meyer and Flenghi (1995) Group 0	Laboratory Study Group 1	Field Study Group 2	Field Study Group 3
Apparatus used	Douglas bag	Moxus (AEI Technologies)	Fitmate Pro (COSMED) 2 devices used	K4b^2 (COSMED) 2 devices used
Sample size	20	26	29	12
Subjects				
Age	29.5 ± 8.7	34 ± 9 (21 – 45) [a]	46 ± 15 (21 – 64)	49 ± 13 (22 – 67)
Weight (kg)	71.4 ± 9.3	79 ± 10 (59.7 – 104)	76.3 ± 10.6 (53.5 – 100)	76.8 ± 12.8 (57 – 101)
Height (m)	1.78 ± 0.07	1.74 ± 0.08 (1.55 – 1.88)	1.74 ± 0.06 (1.63 – 1.88)	1.72 ± 0.06 (1.63 – 1.87)
BMI (kg·m^{-2}) [b]	22.6 ± 2.0	26 ± 2.5 (19.8 – 30.1)	25 ± 2.7 (19 – 30)	25.9 ± 4.6 (19 – 36.2)
Clothing insulation – Icl (clo)	Light clothing: (Icl not reported)	Light clothing: Icl = 0.4 clo Work clothing: Icl = 0.9 clo	Work clothing: 0.95 ± 0.15 (0.55 – 1.39)	Work clothing: 0.80 ± 0.16 (0.57 – 1.12)
Ambient condition during step-test [c]				
Setting	Laboratory	Laboratory	Outdoor	Indoor
Ta (°C)	Not reported	22.0 ± 0.4 (21-22.8)	12.2 ± 4.3 (6.2-19.8)	23.1 ± 1.6 (20-26)
Tg (°C)		-	13.4 ± 4.9 (6.1-24.5)	-
RH (%)		37 ± 2 (35-41)	86 ± 10 (61 – 100)	57 ± 6 (49-72)
Va (m·s^{-1})		< 0.4	0.6 ± 1.0 (<0.4 – 4.7)	< 0.4
WBGT (°C)		17.1 ± 0.5 (16.1-18.1)	12.1 ± 4.0 (5.9-18.7)	20.0 ± 2.1 (16.5-24.3)
Ambient condition during forest work data collection				
Ta (°C)	-	-	17.4 ± 4.8 (9.4-23.8)	17.4 ± 4.8 (9.4-23.8)
Tg (°C)			23.1 ± 8.7 (10.4-40)	21.3 ± 8.4 (8.9-29.4)
RH (%)			71 ± 15 (40 – 96)	64 ± 23 (35 – 97)
Va (m·s^{-1})			1.1 ± 1.2 (< 0.4 – 4.2)	0.5 ± 0.5 (< 0.4 – 1.6)
WBGT (°C)			17.3 ± 4.7 (9.2-24.2)	15.0 ± 5.5 (7.2-20.3)

[a] mean ± standard deviation (range)
[b] BMI = Body Mass Index
[c] Ta = Air temperature; Tg = Globe temperature; RH = Relative humidity; Va = Air velocity; WBGT = Wet Bulb Globe Temperature

4.4.1.1 Step-test HR thermal component

A HR thermal component (ΔHR_T) was present in 18 out of 52 step-tests conducted in the Laboratory study, that is, in 11 out of 26 subjects. In 55% of the 18 step-tests the subject wore the work clothing ensemble and in 61% of them, ΔHR_T was present during the first step-test performed by the subject. A ΔHR_T was present in the two step-tests performed by 7 out of the 11 subjects. ΔHR_T at the start of the ensuing recovery ranged from 4 to 21 bpm. In the field study, a ΔHR_T was observed in 28 out of 41 (68%) forest workers' morning step-tests. ΔHR_T at the start of the ensuing recovery (or at the transition point) ranged from 3 to 19 bpm (mean±sd = 10±4 bpm) and was significantly correlated to HR at the highest step height (Stage 5) ($r = 0.6$, $F_{1,26}=14.95$, $p = 0.0007$) and significantly correlated to estimated MAC ($r = -0.53$, $F_{1,26}=9.94$, $p = 0.004$). No correlation was found between ΔHR_T and clothing insulation wore during the step-test, subject age, weight, height, BMI, WBGT, and $\dot{V}O_2$ at the last step height (all p-value>0.2).

4.4.1.2 Step-test HR and $\dot{V}O_2$

Figure 4-2 displays mean and standard deviation of HR and $\dot{V}O_2$ measured at each stage during the step-tests from both the laboratory and field studies, per subject group. The figure shows the substantial gap that existed between the unadjusted K4b2 and the other $\dot{V}O_2$ data. An ANOVA on step-test $\dot{V}O_2$ group (or measuring apparatus) for work clothing data (black marker in Figure 4-2) showed a statistically significant apparatus effect ($F_{2,66}=29.86$, p-value<0.0001) that disappeared after adjustment of the K4b^2 and Fitmate Pro $\dot{V}O_2$ data ($F_{2,67}=0.76$, p-value=0.50).

4.4.1.3 Clothing insulation (laboratory study)

In the laboratory study, the average total energy expenditure over the duration of the step-test was 90 ±12 kcal (range: 72 to 118 kcal), while at the highest step height (Stage 5: 41.5 cm) the average exertion level was 68% of treadmill measured maximal HR (range: 55 to 98%) and 53% of treadmill measured MAC (range: 38 to 83%). Four-factor (stage, clothing, test period, test sequence) ANOVAs on HR and $\dot{V}O_2$ showed a highly significant stage effect as expected from an incremental submaximal test (HR: $F_{4,\,167} = 913.62$, $p<0.0001$, $\dot{V}O_2$: $F_{4,\,167} = 3617.92$, $p<0.0001$). No significant test sequence effect was found in both measurements indicating that the crossover design was balanced appropriately (HR: $F_{1,24} = 0.69$, $p = 0.42$; $\dot{V}O_2$: $F_{1,23.7} = 0.11$, $p = 0.74$). No

significant clothing or test period effects on HR were present, overall on the 5 stages data ($F_{1, 23.3}$ = 0.77, p = 0.39 and $F_{1, 23.3}$ = 0.11, p = 0.75, respectively). No significant clothing effect on $\dot{V}O_2$ ($F_{1, 30.9}$ = 2.16, p = 0.15) was present, over all stages, but test period was significant ($F_{1, 30.9}$ = 6.08, p = 0.02); an overall 0.35 ml/kg/min lower $\dot{V}O_2$ was measured during the second step-test. Table 4.3 shows the mean difference ± 95%LoA between paired measures of HR, corrected HR and $\dot{V}O_2$ for the clothing insulation worn (work clothing measure minus light clothing measure) and test period (2nd step-test measure minus 1st step-test measure), per stage.

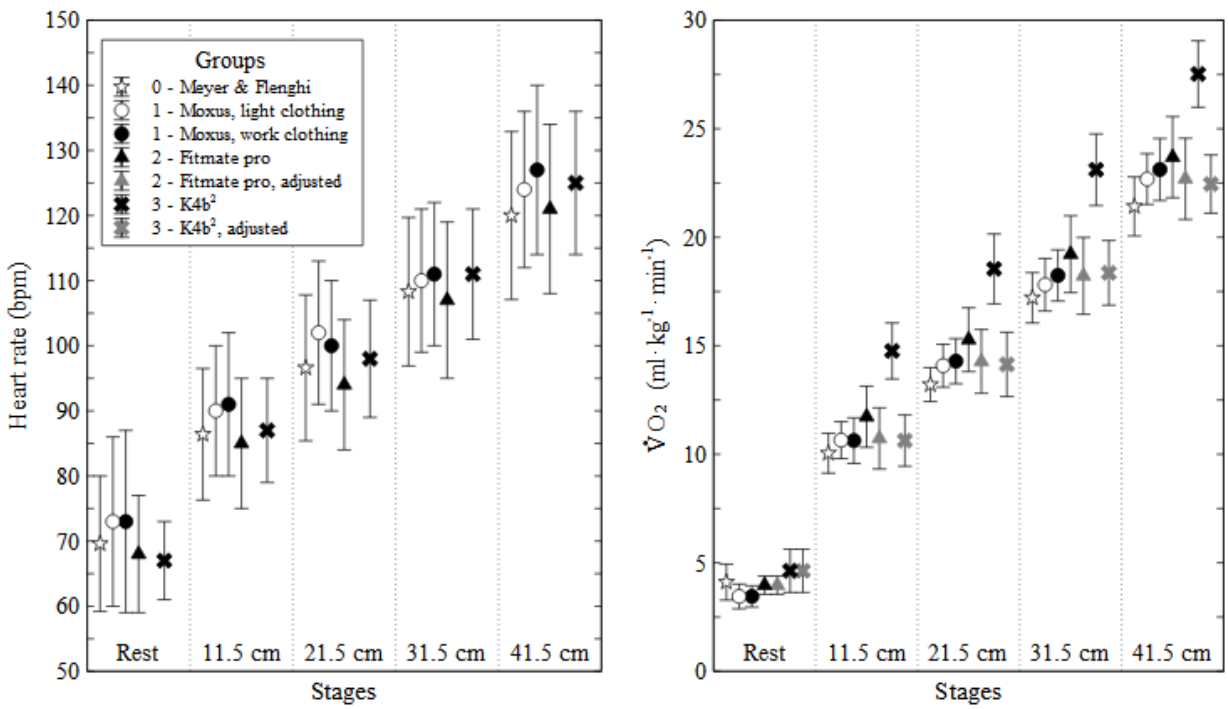

Figure 4-7: Mean and standard deviation of HR and $\dot{V}O_2$ measured during the step-tests for each stage in each subject group. White marker represents light clothing and black and grey markers represent work clothing.

Wearing the work clothing ensemble resulted in an average 0.4 ml/kg/min $\dot{V}O_2$ increase for the two higher steps, but when $\dot{V}O_2$ was adjusted for the 1.5 kg work clothing mass increase the two step-tests yielded virtually identical Stage $\dot{V}O_2$ figures (Table 4.3). Even after the weight adjustment, the period of testing remained significant on $\dot{V}O_2$ ($F_{1, 31.1}$ = 6.42, p = 0.02). Correcting

HR to remove the thermal component, contributed to reducing the HR increases observed with the work clothing at Stages 4 and 5. Post-hoc analyses of clothing and test period per Stage showed no significant differences in HR and $\dot{V}O_2$.

Table 4.7: Mean difference±95%LoA of HR, corrected HR and $\dot{V}O_2$ at each stage of the Laboratory study step-tests for a) clothing, b) test period.

Stage	Heart rate (bpm)	Corrected HR (bpm)	$\dot{V}O_2$ [b] (ml/kg/min)	Adjusted $\dot{V}O_2$ [a, b] (ml/kg/min)
a) Clothing insulation: work clothing value minus light clothing value				
1- Rest	0±8	0±8	0.0±1.0	0.0±1.0
2- 11.5 cm	1±9	1±9	0.0±2.1	-0.2±2.0
3- 21.5 cm	1±8	1±8	0.2±2.2	-0.1±2.1
4- 31.5 cm	1±10	0±9	0.4±1.9	0.1±1.9
5- 41.5 cm	3±11	1±9	0.4±2.5	0.0±2.4
b) Test period: 2nd step-test value minus 1st step-test value				
1- Rest	0±8	0±8	0.1±1.0	0.1±1.0
2- 11.5 cm	0±9	0±9	-0.5±1.8	-0.5±1.8
3- 21.5 cm	0±9	1±8	-0.6±1.9	-0.6±1.8
4- 31.5 cm	0±10	0±9	-0.3±2.0	-0.3±1.8
5- 41.5 cm	-2±12	-1±10	-0.5±2.4	-0.5±2.2

[a] $\dot{V}O_2$ adjusted to account for the 1.5 kg weight increase of the work clothing ensemble

[b] Overall (Stage data pooled) test period effect significant $F_{1, 30.9} = 6.08$, $p = 0.02$ and $F_{1, 31.1} = 6.42$, $p = 0.02$ for garments' weight adjusted $\dot{V}O_2$

4.4.1.4 Step-test Stage $\dot{V}O_2$ prediction equation from all step-test data

Table 4.4 presents the Stage-$\dot{V}O_2$ model fitted to the 93 step-test data that and used to derive the R5 and R6 HR-$\dot{V}O_2$ relationships (Table 4.1). The model uses the same variables as Meyer and Flenghi's (1995) equation: *Hm* is the step height climbed in m/min at each stage (respectively 0, 1.725, 3.225, 4.725 and 6.225), subject *Stature* (m), and *Stage* number (1 to 5). A variable representing clothing as categorical (work, light) or as continuous in clo, and a variable representing $\dot{V}O_2$ measuring apparatus (Moxus, Fitmate Pro, K4b^2) were tested on un-adjusted and

adjusted $\dot{V}O_2$ data. Clothing variables were not statistically significant and thus could not enter the model (results not reported). $\dot{V}O_2$ measuring apparatus had a statistically significant effect with unadjusted $\dot{V}O_2$ data, adding +0 ml/kg/min for Moxus, +0.8 ml/kg/min for Fitmate Pro and +3.7 ml/kg/min for K4b^2, but was not significant with adjusted $\dot{V}O_2$ (result not reported). The Table 4.4 model was therefore fitted to adjusted $\dot{V}O_2$ data so as to give Stage-$\dot{V}O_2$ figures representative of metabolic cart measurements in a broader range of individual characteristic (age, BMI, etc.) and testing conditions than Meyer and Flenghi's equation. Interestingly, two out of the three coefficients of Meyer and Flenghi's (1995) equation fall within the 95% confidence intervals of the fitted model.

Table 4.8: Fitted model using Laboratory study $\dot{V}O_2$ data in ml/kg/min (n=465 datapoints = 93 step-tests × 5 stages).

Parameter	**Fitted model**		**Meyer and Flenghi model**
	Estimate	**95%CI**	**Estimate**
Intercept	7.9	[7.1, 8.7]	7.4
Hm	2.46	[2.36, 2.57]	2.33
Stature/Stage	-2.3	[-2.7, -1.8]	-2.1
r^2	0.98		0.96
RMSE	0.99		1.12

4.4.2 Maximum aerobic capacity (MAC) prediction

The ANOVA results on MAC prediction bias are shown in Table 4.5. Test period, the age-predicted maximum HR equation and *HR*-$\dot{V}O_2$ relationship (R1 to R6) effects were significant. Clothing insulation, test sequence (result not reported) and all interaction terms (results not reported) were not significant. The first step-test underestimated treadmill measured MAC by an average 0.9 ml/kg/min while the second test overestimated by 0.7 ml/kg/min, but these biases were not statistically different from zero. The age-predicted maximum HR equation average biases (220-age: 0.4 ml/kg/min; 207-0.7age: -0.6 ml/kg/min) were not significantly different from 0. R2, R3 and R6 produced biases that were significantly different from zero. Table 4.6 summarizes the analyses results for the different *HR*-$\dot{V}O_2$ relationships using the very commonly used 220-age

equation data (test period and clothing pooled) to predict subject maximum HR. No heterosckedasticity was found in absolute or relative MAC prediction bias for any relationship. The R1 relationship —$\dot{V}O_2$ measured during the step-test and raw HR during the step-test— produced the smallest MAC bias, that is, an average 0.04 ml/kg/min difference with the average of the treadmill measured MAC and predicted MAC. The R4 —$\dot{V}O_2$ estimated with Meyer and Flenghi's equation and corrected step-test HR— and R5 —$\dot{V}O_2$ estimated with the fitted model from Table 4.4 and raw step-test HR— both produced comparable performance in predicting MAC with biases of 0.29 and 0.35 ml/kg/min, that is, a bias smaller of about 1%. The last column of Table 4.6 shows that depending on the relationship used among R1, R4 or R5 a group of 5 to 7 subjects need to take the step-test to achieve a MAC group estimate that falls within ±10% of the true MAC 95% of the time. For R4 and R5, two thirds of the subjects fall within this interval.

Table 4.9: ANOVA results on MAC prediction bias (predicted – treadmill measured).

Effect	**Prediction bias (ml/kg/min)**
Test period	$F_{1, 24}$ = 4.75, p-value = 0.04
1st	-0.9
2nd	0.7
Clothing insulation	$F_{1, 24}$ = 0.19, p-value = 0.67
Light	0.04
Work	-0.27
HR-$\dot{V}O_2$ relationship	$F_{5, 255}$ = 24.93, p-value < 0.0001
R1	-0.6
R2	-3.4 *
R3	3.0 *
R4	-0.8
R5	-0.9
R6	1.9 *
Age HRmax equation	$F_{1, 51}$ = 50.78, p-value < 0.0001
$220 - age$	0.4
$207 - 0.7 \times age$	-0.6

* Biases significantly different from zero at p-value < 0.05

Table 4.10: Mean prediction bias ± standard deviation of differences between measured and estimated MAC, and bias ± 95%LoA for HR-$\dot{V}O_2$ relationships (R1 to R6) using HRmax=220-age (n=52).

	Mean Estimated MAC	**Pearson's r Estimated vs Treadmill**	**Bias ± 95%LoA (mean ± 2*s.d.)**		**Proportion within ±10%**	**Nbr subjects to achieve bias±95%CI[a] =±10%**
	ml/kg/min		**ml/kg/min**	**%**	**%**	
R1	45 ± 7.1	0.73	-0.04 ± 10	-0.4 ± 22	62	5
R2 **	42.2 ± 6.6	0.73	-2.91 ± 9.4	-7 ± 22	67	55
R3 *	48.6 ± 7.3	0.49	3.53 ± 13.6	7.3 ± 28	48	107
R4	44.8 ± 6.2	0.60	-0.29 ± 11	-0.7 ± 24	67	7
R5	44.7 ± 7	0.73	-0.35 ± 9.8	-1.1 ± 22	67	6
R6 *	47.5 ± 6.6	0.60	2.43 ± 11.4	5.2 ± 24	58	25

* p-value < 0.05
** p-value < 0.0001
[a] bias±95%CI = mean bias ± 95% confidence interval of the mean bias. Number of subjects is calculated as $N = (2 \cdot SD_{diff\%}/(10 - |bias_{\%}|))^2$

Table 4.7 shows the treadmill measured MAC results for the laboratory study subjects (Group 1) and the MAC predictions using R1 for the field study subjects (Group 2 and 3). An ANOVA on the group means shows no significant difference ($F_{2,64}$=1.05, p=0.36) although subjects from the laboratory study were significantly younger than forest workers. Compared to the mean treadmill measured MAC of laboratory subjects (45.1 ml/kg/min), the mean prediction biases in Table 4.5 represent prediction errors smaller than 2% for test period, smaller than 1% for clothing, and smaller than 1.5% for age-predicted maximum HR equation.

Table 4.11: MAC results

Groups of subjects	Maximum aerobic capacity (ml/kg/min)
Group 0 : Meyer and Flenghi	Not reported
Group 1 [a] : Laboratory study (Moxus) (n=26)	45.1 ± 6.2 (31.7 – 57.5)
Group 2 [b] : Field study (FitmatePro) (n=29)	42.2 ± 9.6 (23.9 – 59.9)
Group 3 [b] : Field study (K4b^2) (n=12)	39.9 ± 11.8 (27.1 – 70.2)

[a] Measured from maximal treadmill test
[b] Estimated from Meyer and Flenghi's step-test w/ R1

The 200-age equation underestimated HRmax obtained during the treadmill maximal test by a mean 2.6 bpm bias (paired-t test: t_{25}=-1.5, p-value = 0.15) with a ±18 bpm 95%LoA. Similarly, there was a significant 5.2 bpm underestimation bias (95%Loa: ±18 bpm) using the Gellish et al. (2007) equation (paired-t test: t_{25}=-1.5, p-value = 0.15).

4.4.3 Work $\dot{V}O_2$ (WM) estimation

An ANOVA on WM showed a significant HR-$\dot{V}O_2$ relationship effect ($F_{5, 195}$=31.49 , p=0.0001). The mean measured $\dot{V}O_2$ adjusted according to the apparatus (K4b2 or Fitmate Pro) during the work bout was 17.5±4.5 ml/kg/min (range: 11.2 - 28.3). Table 4.8 summarizes the results on WM prediction bias and LoA analysis for the different HR-$\dot{V}O_2$ relationships (R1 to R6). The table shows the results for R1 with both raw (as measured in the field) and corrected (thermal component removed) forest work HR and for R2 to R6 with corrected forest work HR. Heterosckedasticity was not present in absolute and relative bias over the range of measurement for any relationship (R1 to R6) when work corrected HR is used. When work HR is used (rawHR R1 in Table 4.8), absolute and relative bias depict a significant positive correlation with the measurement scale (results not reported). The increase in prediction bias is caused by an increased ΔHR_T in the forest work data (Dubé et al., 2014).[3]

[3] cf. Chapitre 3, section 3.4.3 et section 3.5

Table 4.12: Mean WM estimates and prediction bias±95%LoA between $\dot{V}O_2$ estimates from using R1 to R6 and $\dot{V}O_2$ measured during the work bout in the field study (n=41). Results are presented using corrected forest work HR for R1 to R6, as well as with raw forest work HR for R1.

	Mean WM estimate	**Pearson's r Estimated vs measured**	**Prediction Bias ±95% LoA**		**Proportion within ±10%**	**Nbr subjects to achieve 95%CI[a]=±10%**
	ml/kg/min		**ml/kg/min**	**%**	**%**	
rawHR (R1)	22.8±6.4	0.88	5.3±6.5 [b]	25.7±27 [b]	17	indefinite
R1	17.4±4.3	0.92	0.04±3.5	-0.2±21	71	5
R2 *	18.7±4.4	0.90	1.3±3.9	7.4±21	63	69
R3 *	16.3±5.4	0.87	-1.2±4.4	-6.5±25	46	49
R4	17.5±5.6	0.84	0.1±4.8	1.5±26	41	10
R5	17.2±5.7	0.87	-0.3±4.4	-0.8±25	63	7
R6 *	18.6±5.9	0.84	1.1±4.8	7.2±26	46	86

* p-value < 0.05
** p-value < 0.0001
[a] bias±95%CI = mean bias ± 95% confidence interval of the mean bias. Number of subjects is calculated as $N = (2 \cdot SD_{diff\%}/(10 - |bias_{\%}|))^2$
[b] Significant positive correlation with measurement scale (non constant bias)

The R1 relationship —$\dot{V}O_2$ measured during the step-test and adjusted depending on device and raw step-test HR— with forest work HR (corrected for thermal component) produced the best WM estimate with an average 0.2% bias while use of the raw HR (uncorrected for thermal component) produced the largest bias at 25%, that is, a 30% error on the average measured $\dot{V}O_2$ (i.e., 18.2 ml/kg/min). R5 —step-test $\dot{V}O_2$ values predicted with the Table 4.4 model and raw step-test HR— performed second best with an average 0.8% underestimation bias while R4 —step-test $\dot{V}O_2$ values predicted by Meyer and Flenghi's equation and corrected step-test HR—followed very closely with a 1.5% overestimation bias. R2, R3 and R6 performed less well in predicting WM from work HR (corrected and uncorrected) as their mean biases were significantly different from zero. To achieve a group average WM prediction with a smaller than 10% bias R1 requires that 5 subjects take the

step-test and that $\dot{V}O_2$ be measured during the test, while R5 and R4 require 7 and 10 subjects, respectively without the need to measure $\dot{V}O_2$ during the test.

4.5 Discussion

In the two studies reported here, 93 Meyer and Flenghi (1995) step-tests were administered to 26 subjects attending physical activities in a University training center (Laboratory) and to 41 experienced forest workers (Field study) in order to determine individual subject's HR-$\dot{V}O_2$ relationship. The step-tests were administered in widely varying ambient conditions to groups of subjects with different occupations and wearing varying clothing insulation during the step-test. In the laboratory study, the HR-$\dot{V}O_2$ relationship was extrapolated to the subject's maximal age-predicted HR to obtain a MAC prediction that was compared with the outcome of a maximal treadmill test. The effect on the MAC prediction of using either of two age-predicted maximum HR equations, as well as the effect of clothing insulation during the step-test, were explored. In the field study, HR measurements during forest work were used with the HR-$\dot{V}O_2$ relationship to estimate WM which was compared against concurrent $\dot{V}O_2$ measurements. In both the laboratory and field studies, the thermal HR component was taken into account when observable in the recovery curves from the step-test or from forest work.

Subjects from the laboratory study were significantly younger than the forest workers of the field study, but mean group MAC were not statistically different. MAC variability was larger in forest workers however with coefficients of variation of 23% and 30% for group 2 and 3 respectively vs 14% for the subjects in the laboratory study. Using Mital and Shell's (1986) data on MAC, the laboratory subjects' average MAC corresponded to the middle of the range proposed for "Good" MAC for their age group, while the forest workers were at the upper limit of the corresponding range. Hence, on a relative basis, forest workers had on average a slightly better MAC than the laboratory subjects. This study's group MAC means were well above the "Average" MAC range proposed by Mital and Shell (1986).

The forest work performed in the field study (tree planting and regeneration release) elicited an average workload (18.2 ml/kg/min) that corresponded to Stage 4 of the Meyer and Flenghi (1995) step-test (31.5 cm step height, Figure 4.2). Hence, this step-test was an appropriate choice because it sampled most of the range of workloads elicited during forest work with a type of exercise (bench

stepping) that involves primarily the lower limbs as in forest work (walking while carrying a small trees or a powered saw in difficult terrain conditions) (Apud et al., 1989).

Variability in HR and $\dot{V}O_2$ measurements between the two consecutive MF step-tests conducted in this study were lower for any individual stage (Table 4.3) than the variability figures presented by Buckley, Sim, Eston, Hession and Fox (2004) for Chester step-tests performed on separate days. The Chester Step-test is a bench multistage submaximal test similar to that of Meyer and Flenghi step-test, but it uses stepping rate increments to elicit varying workloads instead of height increments. Although it was primarily designed for MAC assessment, it relies on the linear relationship between workload and submaximal HR and, therefore, can be used also to assess WM. In the Chester step-test the bench height is set at 15 cm to 30 cm depending on the subject's age and physical history. The stepping rate starts at 15 steps/min and increases by 5 steps/min every 2 min until the subject reaches 85% of his maximum age-predicted HR (per 220-age). Subject's MAC is then estimated by extrapolating a best-fit linear regression between measured HR at the end of each 2-min stage and predetermined $\dot{V}O_2$ values. Just as the Meyer and Flenghi step-test, the Chester step-test does not require measurement of $\dot{V}O_2$ per se (Sykes, 1998). The lower HR and $\dot{V}O_2$ variability obtained in MF step-tests possibly results from the constant slow stepping rate that makes it easier for a subject to follow the pace and thus makes measurements more consistent. Buckley et al. found a significant mean bias in MAC prediction on the first trial and a non-significant -1.9 ± 7.4 ml/kg/min Mac underestimation on the second trial. The significant -0.35 ml/kg/min mean bias with R5 (Table 4.6) compares favorably while its ±9.8 ml/kg/min variability in prediction bias was slightly larger than Buckley et al.'s. This slightly higher variability could be the consequence of a less demanding highest exertion level on MF's step-test (Stage 5) compared to the Chester step-test highest workload level, and of a more heterogeneous subject sample in this study than Buckely et al. (2004) who used only young university students.

Results of the laboratory study show that wearing a clothing ensemble providing a 0.9 clo insulation and weighing 1.5 kg more than light sporting clothes (t-shirt, shorts and running shoes) during the step-test did not affect significantly stage-$\dot{V}O_2$, stage-HR nor MAC prediction. Minor increases were observed in HR and $\dot{V}O_2$ (Table 4.3) especially at Stages 4 and 5 but these were not statistically different from zero and since they were concurrent the HR-$\dot{V}O_2$ relationship remained virtually unaffected. This was supported by a smaller than 1% mean MAC prediction bias

associated with wearing work clothes during the step-test vs treadmill measured MAC. Based on these results and from a practitioner's point of view, having a worker wear light sports clothes or regular work clothes (0.9 clo and weight difference up to 1.5 kg) has no impact on the accuracy of the Meyer and Flenghi step-test in predicting MAC. The second step-test administered in the laboratory study showed a statistically significant smaller overall $\dot{V}O_2$ (0.35 ml/kg/min) likely due to a learning effect and/or habituation to the $\dot{V}O_2$ measuring device (mouthpiece and nose clip). This difference caused a decrease in the slope of the HR-$\dot{V}O_2$ relationship which produced a slight MAC overestimation (0.7 bias in Table 4.4) that was not statistically significant. This result although interesting is of little concern to the practitioner since he or she will probably never have the same subject take two consecutive step-tests or proceed to a familiarization procedure (Shephard, 1978) and considering that the resulting bias is negligible on MAC prediction (less than 1.6% on average).

The 220-age equation is widely used to predict HRmax, but it does not seem to rely on extensive research (Robergs & Landwehr, 2002). It underestimated slightly treadmill measured HRmax on a group basis, and a large variation was observed among subjects with differences up to ±20 bpm with a subjects measured HR max as reported in other studies (Londeree & Moeschberger, 1982; Rodahl, 2003; Buckley *et al.*, 2004; McArdle *et al.*, 2006). Other formulae have been proposed as better alternatives (Gellish *et al.*, 2007; ISO 8996:2004; Robergs & Landwehr, 2002) although Gellish et al.'s (2007) equation also underestimated treadmill HRmax at group level with a similarly large inter-individual variation. The statistically significant effect of the age-predicted maximum HR equation on MAC prediction can, therefore, be explained by the systematically lower estimates given by the Gellish equation compared to 220-age in the age range of this study's subjects. However, the effect of the age-predicted maximum HR equation was practically insignificant on the MAC prediction with an average error smaller than 1.4% of the treadmill measured value. Therefore, both equations seem equally suitable to predict MAC using the MF step-test. On the other hand, the large inter-individual variation in true HRmax found in this study supports the claims of some authors that using a HRmax equation to predict MAC is unjustifiable (instead true HRmax should be used) (Robergs & Landwehr, 2002) while others indicate that other factors such as stage-$\dot{V}O_2$ estimates may contribute more to the MAC prediction error (Buckley *et al.*, 2004). To test whether the age-predicted HRmax equation results in a greater MAC prediction bias than actual treadmill measured maximum HR, we repeated the analysis only to find no improvement in

MAC prediction with the latter. For instance, the bias±95%LoA was 0.9±10 ml/kg/min for R1 and 0.6±10 ml/kg/min for R5, that is, figures comparable to those of Table 4.6. From a practitioner's point of view, using the commonly cited 220-age equation provides MAC predictions that are comparable to the more recent Gellish et al. (2007) equation, and comparable to using the subject's true HRmax when it is known.

When predicting a subject's MAC with Meyer and Flenghi's (1995) step-test, our results confirm that measuring $\dot{V}O_2$ with a metabolic cart during the step-test yields the best accuracy with a prediction bias smaller than -0.4% (R1 in Table 4.6). Since MAC is determined by extrapolation from the step-test data, the more accurate the data during the step-test the better the MAC prediction. Even if $\dot{V}O_2$ is measured during the step-test, a minimum of 5 subjects will still be needed if a ±10% on the group mean MAC bias is to be achieved 95% of the time (Table 4.6). However, measuring $\dot{V}O_2$ during the step-test requires an expensive piece of equipment that few practitioners may be willing to invest in and maintain. It also adds to the cost of conducting the test and complicates the procedure because of the many extra manipulations and precautions required, and as well the frequent worker objections to wearing a mask. In comparison, a HR monitor is cheap, easy to manipulate and subjects will rarely object to wearing it since it is not intrusive. Hence, the alternative, is to use the Table 4.4 model to predict $\dot{V}O_2$ at each stage of the Meyer and Flenghi (1995) step-test and use the subject's HR values measured at each stage to build his HR-$\dot{V}O_2$ relationship from which MAC can be extrapolated with the subject's age-predicted maximum HR of 220-age. Based on our results, this much simpler approach (R5, Table 4.6) yields a slightly lower accuracy than R1 (-1.1% prediction bias) without the need to measure $\dot{V}O_2$ during the step-test. The R4 HR-$\dot{V}O_2$ relationship performed almost as well (-0.7% prediction bias with a slightly lower Pearson's r), but requires more work on the part of the analyst since the subject's HR data at Stages 3 to 5 must be corrected if a thermal component is observable in the step-test HR recovery profile (35% of 52 laboratory step-tests conducted in this study). With R4, once the HR profile is corrected the subject's HR-$\dot{V}O_2$ relationship can be built and used to predict MAC. To achieve a ±10% bias 95% of the time in a group mean MAC, R5 and R4 require that 1 and 2 more subjects, respectively, take the step-test in comparison with R1. Based on the results of this study, and from a practitioner's point of view, the approach using R5 is the simplest and most cost effective, while providing a MAC prediction accuracy equivalent to actual $\dot{V}O_2$ measurements during the step-test.

Just as for MAC prediction, the R1 relationship —$\dot{V}O_2$ measured during the step-test and raw HR— offered the best estimate of WM from work HR measurements corrected for the thermal component while R5 offered the best alternative. In both cases the WM mean prediction bias and 95% CI (Table 4.8) are very similar to corresponding MAC results (Table 4.6); the mean prediction bias was under 1% and the 95%CI at ±25%. Correlation coefficients were better for WM estimation than MAC prediction. This result is reassuring about the robustness of the approach since the R5 relationship was based on the Table 4.4 model which was fitted through step-test data mostly obtained with subjects who were significantly younger, were not forest workers, wore light clothing in half of the tests, and took the tests in ideal laboratory conditions (52 step-tests out of 93 = 56% of the data). The fitted model predicted WM with an average 1% bias with forest workers who took the test mostly outside near the work site (29 out of 41 tests).

There is no clear definition of what is an acceptable threshold or limit to determine whether a prediction method for $\dot{V}O_2$ is acceptable or not. In terms of absolute error such as LoA a threshold of ±15-20% is often cited, but limits of up to 30% can be deemed acceptable (Leonard, 2003; Spurr *et al.*, 1988). ISO 8994 (2004) indicates that WM prediction from work HR measurements offers a ±10% accuracy, however the interpretation of this figure is not clarified (relative error, prediction bias, Confidence interval limits, 95%LoA). The results of this study indicate that the mean prediction bias on WM that can be expected when using R5 (-0.8%) is one order of magnitude smaller than the ISO figure. On the other hand, the 95%CI on the estimate for a single subject is ±25%, that is significantly higher than the ISO figure, but coherent with the literature (Spurr *et al.*, 1988). To achieve a ±10% accuracy on a group mean prediction bias, a group of 7 subjects is required if R5 is used to build the HR-$\dot{V}O_2$ relationship of the subjects (10 if using R4), that is, a group of subjects that is realistic and feasible in the context of an ergonomic intervention conducted by a practitioner.

The results from this study show that the step-test HR profile does not need to be corrected when a HR thermal component is observable in the step-test recovery profile (46 out of 93 step-tests). In the laboratory study, this component was present in 35% of the step-tests (18 out of 52) and in 68% of the step-tests of the field study (28 out of 41). Best MAC and WM prediction were achieved with uncorrected or raw step-test HR data (i.e., R1 and R5), and this is good news for the practitioner since this reduces the work needed to built a subject's HR-$\dot{V}O_2$ relationship. However,

if Meyer and Flenghi's equation must be used to build a subject's HR-$\dot{V}O_2$ relationship, then one needs to correct the step-test HR recovery profile to achieve good prediction (Table 4.8). The reasons for this are not clear and more research is needed to better characterize step-test recovery profiles and determine what effect or subject characteristics an apparent HR thermal component may be associated to. On the other hand, when a thermal component is observable in the HR recovery profile following work it must be removed from the HR work data if accurate WM is to be achieved since using raw work HR data to predict WM can lead to large prediction errors. The method proposed by Vogt et al. (1970, 1973) requires that the HR profile during recovery be carefully examined to determine the HR thermal component and that the work HR profile be adjusted accordingly. This is a time-consuming process especially if many subjects participated in the study, but for the practitioner it is often more realistic than measuring $\dot{V}O_2$ in an actual work environment. More research on how to reliably detect the HR thermal component during the data collection is needed, as this would significantly speed the HR data analysis process.

The results from this study tend to show that the K4b^2 and Fitmate Pro measuring devices overestimate true $\dot{V}O_2$. This was also observed by other researchers in the case of the K4b^2 and their results were used to adjust the measurements conducted in this study. We hypothesized that the differences in mean step-test Stage-$\dot{V}O_2$ values between the subject groups (Group 1: Moxus cart, Group 2: Fitmate Pro, Group 3: K4b^2) were due to a measuring device effect rather than to different subject characteristics since theoretically at a given Stage of the step-test, two subjects having the same weight and stature and wearing the same clothes should have the same Stage-$\dot{V}O_2$. Differences between subject group mean weight and mean stature were not statistically significant and thus could not explain the large gaps observed between the step-test $\dot{V}O_2$ data, especially for the K4b^2. From a practical point of view, if a practitioner elects to measure $\dot{V}O_2$ using either a K4B^2 or a Fitmate Pro he or she should adjust the $\dot{V}O_2$ data if comparisons with the literature or with metabolic cart data are planned. In the case of the K4b^2 the average $\dot{V}O_2$ reduction at Stage 5 of the step-test (Moxus cart with work clothes = 23 ml/kg/min, Figure 4.2) is close to 20% per Duffield et al. (2004), while for the Fitmate Pro it is closer to 4% (this study data).

4.6 Conclusion

The purpose of this study was to document four methodological issues faced by practitioners in the determination of MAC and WM form HR measurements. In this study, the Meyer and Flenghi (1995) submaximal step-test used to determine the subjects HR-$\dot{V}O_2$ relationships sampled the range of forest work workload levels studied. This study shows that MAC and WM can be accurately predicted (mean prediction bias of 1% with ±25% 95%LoA) using work HR measurements together with the fitted model presented herein to build a subject's HR-$\dot{V}O_2$ relationship. From a practitioner's point of view, this level of accuracy is equivalent to that of measuring $\dot{V}O_2$, but without the complexities of using portable $\dot{V}O_2$ instruments in actual work environments. Normal work clothing worn by the subject during the step-test had no impact on his predicted MAC, thus obviating the need to have a worker undress and don light running clothes for the purposes of the step-test. The age-predicted maximum HR equation used had a statistically significant but a practically insignificant impact on a subject's MAC prediction (smaller than 1.5% mean bias). Results show that removing the HR thermal component from the step-test HR profile does not improve MAC or WM prediction. However, any HR thermal component present during work should be removed from the work HR data following the method proposed by Vogt et al. (1970, 1973).

4.7 Acknowledgements

The authors wish to thank Dr. Laurent Bosquet and Mr. Arthur Long of the Kinesiology Laboratory of University of Montréal for making their research facilities available and for providing technical assistance that made the Laboratory study possible. The authors also wish to acknowledge the contribution of Olivier Waddell, Steve Lemay, Adam Page, Dr. Yeni Arias, Dr. Laurent Giraud, Bastien Thibodeau, Marie-Ève Pelchat and Merieme Kerchi with data collection and preparation. This work was supported by the Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs; the Fonds de recherche du Québec - Nature et technologies (FRQNT); and the Natural Science and Engineering Research Council of Canada (NSERC), through the Canada Research Chair in Ergonomics of Polytechnique de Montréal.

CHAPTER 5 : ARTICLE 3 : IMPROVING WORK METABOLISM ESTIMATION FROM WORK HEART RATE: COMPARISON OF TWO METHODS TO ASSESS THERMAL CARDIOVASCULAR DRIFT

Philippe-Antoine Dubé [a*], Daniel Imbeau [a], Denise Dubeau [b]

[a] *Department of Industrial Engineering and Mathematics, Polytechnique Montréal, Montréal, Canada*

[b] *Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière, Québec, Canada*

** Corresponding author*

Address: C.P. 6079, Succursale Centre-Ville, Montréal (Québec), Canada, H3C 3A7

E-mail address: philippe-antoine.dube@polymtl.ca

Article soumis pour publication dans *International Journal of Industrial Ergonomics* le 24 novembre 2014.

5.1 Abstract

Concurrent body core temperature, heart rate (HR), and energy expenditure were obtained during forest work. Vogt et al.'s method (1970; 1973) and Kampmann et al.'s method (2001) were used to assess cardiovascular drift or HR thermal component associated with body heat accumulation over a complete work day in 30 forest workers. The HR thermal component was deducted from the work HR data to obtain a thermoneutral HR profile from which work metabolism was estimated for n=15 workers. The two methods yielded comparable average HR thermal component estimations of 26 and 31 bpm/˚C. Overall the Vogt et al. method provided a slightly better work metabolism estimation with a bias ± 95%LoA of 0.5 ± 4.4 mlO_2/kg/min or 2.2% ± 21.6%. Considering the Vogt et al. method is simpler to implement, it appears as a natural choice for the practitioner.

Keywords: Cardiovascular drift, work metabolism, field methodology, forest work

Highlights:

- Both methods substantially reduce the overestimation of forest work $\dot{V}O_2$ compared with using uncorrected measured heart rate, although the Vogt et al. method performed slightly better.
- The Vogt et al. method was found easier to apply and less prone to data loss.
- Both methods agree closely with ISO 9886:2004 figures and, thus can be used to organize work-rest cycles.
- In cases where the Vogt et al. method cannot be used, the Kampmann et al. method based on intestinal temperature measurement is a feasible although more complex alternative.

5.2 Introduction

Heart rate measurement is often proposed as a practical and easy method of assessing physical workload of work tasks as heart rate (HR) and energy expenditure are closely related. The relationship between the two variables, generally obtained through submaximal testing, is linear over a range of workloads that correspond to a wide range of physical work activities performed in various industries. However, HR is a global indicator of physiological strain and thus reflects not only energy expenditure associated with physical work, but also other physiological responses to stressors among which heat stress is very frequent in work environments and often affects most HR (ISO 8996:2004). The presence of such stressors during work may change the slope of the relationship between HR and energy expenditure resulting in substantial overestimations of true work metabolism (Nielsen & Meyer, 1987).

Vogt et al. (1970, 1973) proposed a method by which the HR thermal component, that is, the number beats per minute attributable to the effect of heat stress can be estimated simply through recovery HR during a 10-min seated rest pause following a work period in the heat. Since the method informs on the HR thermal component at the end of the work period, one has to assume a linear increase in body heat accumulation during the work period, which is likely to be realistic with fairly constant heat and workload exposure conditions. However, HR thermal component accuracy throughout the work period is likely to degrade significantly when conditions include transients in workload and heat exposure. This loss of accuracy will in turn degrade the work metabolism estimation from HR measurements.

Kampmann et al. (2001) proposed an alternative method to assess the HR thermal component without the need to impose a number of 10-min recovery periods as with Vogt et al.'s method, which constitute an advantage in circumstances where work cannot be interrupted easily. This method also offers the possibility to better describe the thermal HR component in condition of varying workload and heat exposure. Kampmann et al.'s method is based on rectal temperature measurement throughout the entire work shift to determine a subject's thermal reactivity. With this variable known, the subject's HR profile reflecting work in thermoneutral conditions can be determined for the entire work shift, from which work metabolism can be estimated with accuracy.

The purpose of this paper was to compare work metabolism estimation accuracy between the two methods described above on the same dataset collected in forest workers.

5.3 Methods

5.3.1 Subjects

This study data was assembled from data collections conducted in three research projects on physical workload and productivity of forest workers. Thirty male forest workers with a minimum of three years of experience in performing regeneration release (brushcutting) volunteered and signed an informed consent to participate in this study (Table 5.1). Subjects completed a Physical Activity Readiness Questionnaire (PAR-Q) and were screened regarding contraindication to ingesting a telemetric pill (e.g. Crohn's disease, diverticulosis, constipation) through the use of a specific questionnaire approved by the ethics comity of Polytechnique Montréal. Health and safety risks associated with the use of the telemetric pill were thoroughly explained before subjects gave their written consent.

5.3.2 Variables and apparatus

Heart rate and intestinal temperature were measured throughout the work shift for all subjects. For n = 18 subjects, HR was recorded at 5 s intervals using a HR monitor (RS800, Polar Electro Oy, Kempele, Finland) and intestinal temperature was recorded with the Vitalsense monitor (Philips Respironics, Murrysville, PA). Intestinal temperature was measured using Jonah® telemetric pills (Philips Respironics, Murrysville, PA; reported accuracy of ±0.1°C). Intestinal temperatures were logged every minute, the shortest interval rate allowed by the Vitalsense monitor. For n = 12 subjects, HR ECG and the intestinal temperature were logged simultaneously using the Equivital physiological monitor (Hidalgo, Cambridge, UK). The ECG was downsampled to 5-sec intervals with the manufacturer's proprietary software while the intestinal temperature was logged at 15-sec intervals. For a subgroup of 15 subjects (right column in Table 5.1), breath-by-breath $\dot{V}O_2$ was measured during a morning submaximal step-test and during forest work with two portable measuring apparatuses: a Fitmate Pro (Cosmed, Rome, Italy) for n=4 subjects and a K4b^2 (Cosmed, Rome, Italy) for n=11 subjects. Both instruments have been validated against the Douglas bag over $\dot{V}O_2$ values ranging from rest to maximal aerobic capacity (McLaughlin et al. 2001; Nieman et al.,

2006, 2007). Ambient conditions (dry bulb temperature - Ta, globe temperature - Tg, air velocity - Va, relative humidity - RH, and atmospheric pressure - Pa) were measured during the step-test and recorded throughout the day at 5 s intervals at the work site using a tripod-mounted Kestrel® 4000 weather meter (Nielsen-Kellerman Co., Boothwin, PA) equipped with a vane and globe thermometer. All measuring devices were synchronized to GPS time and, the $\dot{V}O_2$ measuring apparatuses calibrated according to the manufacturer's recommendations.

Table 5.13: Subject characteristic, clothing insulation and ambient conditions during workday

Variable	Overall (n = 30)	Subgroup (n = 15)
Subjects		
Age	46 ± 10 (22 - 67) [a]	48 ± 12 (22 - 67)
Weight (kg)	81 ± 15 (57 - 121)	76 ± 10 (57 - 89)
Height (m)	1.7 ± 0.1 (1.6 - 1.9)	1.7 ± 0.1 (1.6 - 1.9)
BMI ($kg \cdot m^{-2}$) [b]	27 ± 5 (20 - 41)	25 ± 3 (20 - 29)
$\dot{V}O_2max$ (ml/kg/min)	45.9 ± 10.6 (29.6 - 68)	44.6 ± 10.6 (29.6 - 68)
Resting HR (bpm)	66 ± 9 (52 - 88)	64 ± 5 (56 - 74)
Clothing insulation – Icl (clo)	1.1 ± 0.3 (0.6 - 1.7)	1.1 ± 0.3 (0.8 - 1.7)
Ambient conditions [c]		
Ta (°C)	18.6 ± 6.3 (7.2 - 29.7)	18.0 ± 5.3 (7.2 - 25)
Tg (°C)	23.6 ± 9.4 (8.9 - 45.9)	21.1 ± 7.6 (8.9 - 30.4)
RH (%)	64 ± 20 (34 - 97)	67 ± 21 (35 - 97)
Va ($m \cdot s^{-1}$)	1 ± 1.3 (0.1 - 6)	0.9 ± 1.1 (0.1 - 3.7)
WBGT (°C)	16.6 ± 5.3 (7.2 - 23.7)	15.5 ± 5.0 (7.2 - 21.5)

[a] mean ± standard deviation (range)
[b] BMI = Body Mass Index
[c] Ta = Air temperature; Tg = Globe temperature; RH = Relative humidity; Va = Air velocity; WBGT = Wet Bulb Globe Temperature

5.3.3 Procedure

Workers were met early in the morning before breakfast (around 0500) and asked to don the physiological monitor and ingest the telemetric pill to allow sufficient time for it to settle into the intestine before the start of the workday. About an hour after breakfast (around 0630 to 0730), subjects took the Meyer and Flenghi (1995) submaximal step-test, a bench-stepping multistage test designed to be simple, cost-effective, and practical. This test can be implemented safely without imposing high cardiovascular strain on the subject (below 60% HRmax), therefore minimizing

possible effects on subsequent HR and $\dot{V}O_2$ measurements. Imbeau et al. (2010) showed that this test's highest exertion levels corresponded well to typical brushcutting work. A detailed description of the test can be found in (J. P. Meyer & Flenghi, 1995; Imbeau *et al.*, 2009; Dubé *et al.*, 2014[4]). The step-tests took place outdoors near the worksite for a number of participants (n=18) and indoors in an air-conditioned room (Ta = 20˚ C, RH = 50%, Va = 0.2 m/s) for the others. Workers wore their regular work clothes during the step-test (clothing insulation – Icl between 0.6 to 1.3 clo). Following a brief rest pause after the test the workers were released to begin their workday which lasted an average of 518 min and started roughly 3 hours after ingestion of the telemetric pill.

Four seated 10-min rest pauses were imposed on the subject at his work site (mid AM, before lunch, mid PM, and end of workday) to assess the HR thermal component using Vogt et al.'s method at different moments of the workday. These pauses always followed the most physically demanding part of the work cycle (planting or brushcutting work) and preceded any work activity that could contribute partially to rest (e.g., walking, tree rebagging, filing the blade, filling with gas)(Vogt et al. 1970). A portable chair equipped with a hood to protect against the sun was installed in the shade whenever possible. Subjects were not allowed to eat, speak or move during the pauses to ensure a HR recovery profile as smooth as possible.

Subjects were asked to refrain from drinking cold beverages and prefer room-temperature drinks to minimize perturbation in core body temperature measurements. This could not be enforced thoroughly in some subjects (Figure 5.1). Abnormal data could be readily identified in the core temperature profile and were discarded.

5.3.4 Data preparation and processing

5.3.4.1 Data preparation

Breath-by-breath $\dot{V}O_2$ data were examined to remove aberrant (i.e. ±3 s.d. of the local mean) or missing values, and then smoothed using a 7-point window to reduce perturbations caused by coughing, swallowing, etc. in the mask. Subject maximum aerobic capacity was estimated by

[4] cf. Chapitre 3, section 3.3.2

extrapolation of the step-test *HR*-$\dot{V}O_2$ relationship to HRmax = 220 – age. Clothing insulation (Icl) worn by each worker was assessed using (ISO 9220:2007).

5.3.4.2 HR thermal component assessment

The HR thermal component was determined graphically through close examination of the HR profile during each 10-min seated rest pause per Vogt et al. (1973). This component corresponds to the elevation above rest HR at the transition point between the end of the motor component recovery and the beginning of the thermal component recovery (Figure 5.1). The HR thermal component (ΔHR_T) was calculated as the average HR over a 1-min time window centered at the transition point (point 3 in Figure 5-1). Since ΔHR_T is believed to be constant over the duration of the motor component recovery (Mairiaux et Malchaire, 1990) it also serves as an estimate of ΔHR_T at the end of the work period immediately preceding the 10-min rest pause (point 2 in Figure 5-1). From the transition point on the rate of decrease in ΔHR_T was estimated using the slope of the HR profile between the transition point and the end of the rest pause (point 3 to point 4 in Figure 5-1). This decrease was then extrapolated until the outset of brushcutting work or until resting HR was reached, whichever came first. Using this approach, the ΔHR_T profile for the entire workday was traced by interpolating between ΔHR_T values. At the beginning of the workday, ΔHR_T was assumed to be zero.

Per Kampmann et al. (2001) the HR thermal component was estimated using the thermal cardiac reactivity derived from a plot of HR vs core body temperature (Tc) measurements over the workday. A piecewise function was manually constructed using these authors' three criteria: 1) the piecewise function is linear; 2) it intersects with the lower part of the *HR-Tc* scatter plot; and 3) the function is constant at low Tc. A line at resting HR was plotted to help gauge the function at low Tc (Figure 5-1). The function was used to estimate ΔHR_T from the worker's Tc measurements and trace the ΔHR_T profile throughout the workday.

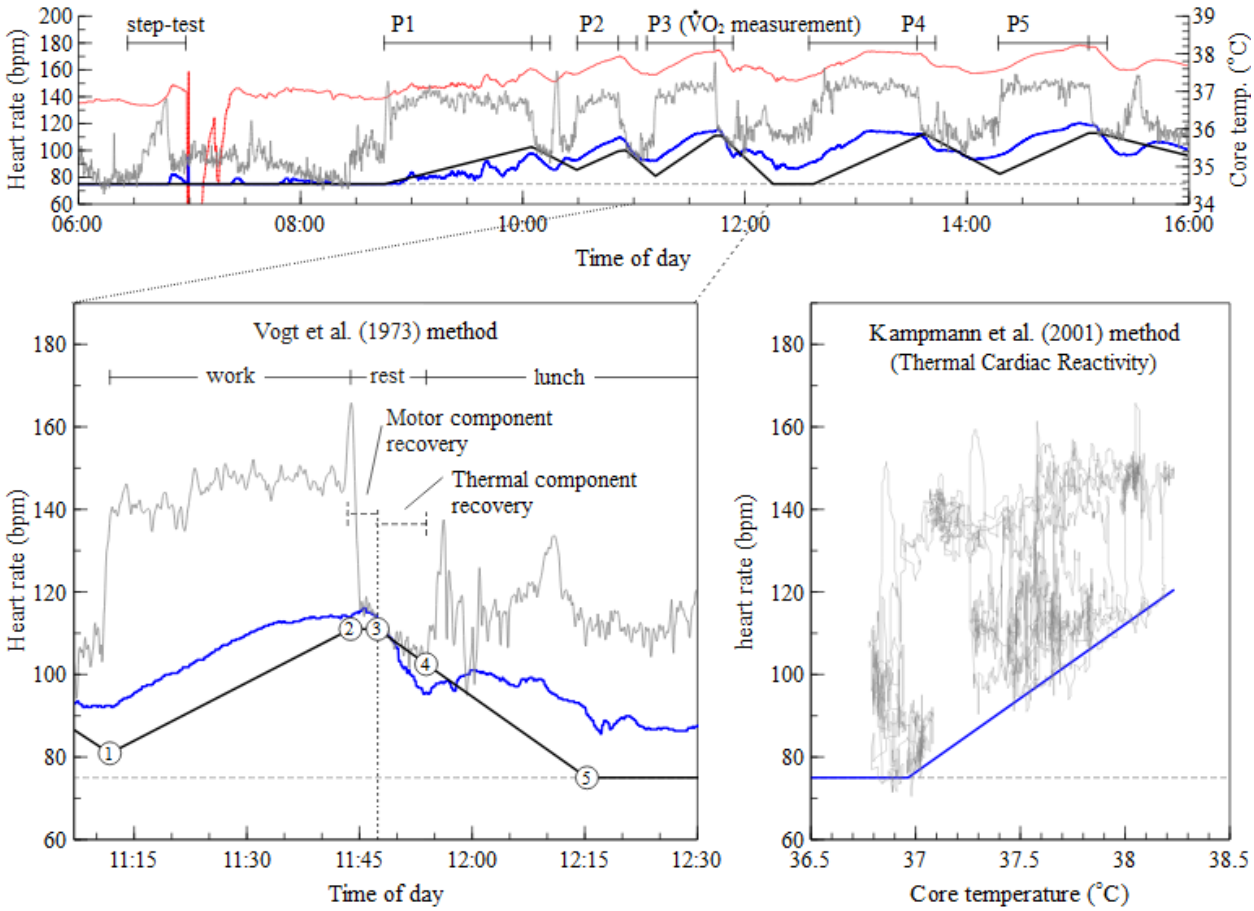

Figure 5-8: Example of application of the two methods to assess the HR thermal component over a workday. Upper chart displays HR (grey), measured core temperature (red), HR thermal component per Vogt et al.'s (black) and Kampmann et al.'s (blue) methods, respectively. Bottom charts display a close-up of Vogt et al.'s method during work phase P3 (left), and thermal cardiac reactivity function per Kampmann et al.'s method (right).

5.3.5 Data processing

The ΔHR_T profile produced with each method was subtracted from the measured HR profile to obtain a thermoneutral HR profile that served as input to the HR-$\dot{V}O_2$ relationship to estimate work $\dot{V}O_2$. All data (HR, corrected HR, Tc, ΔHR_T, estimated and measured $\dot{V}O_2$, etc.) were averaged minute-by-minute. Minute-by-minute ΔHR_T was averaged over the entire workday duration and compared between Vogt et al. and Kampmann et al. methods.

Each worker's workday was also divided into 4 to 5 phases each including a work period immediately followed by a 10-min rest break as shown at the top of Figure 5-1 (P1 to P5). ΔHR_T at the start and end of the work and rest period of each phase were computed. The variation in the HR thermal component (ΔHR_T) over time was computed for each period (work and rest) as (ΔHR_{Tend}–ΔHR_{Tstart}) while the rate of ΔHR_T variation was computed as $(\Delta HR_{Tend} - \Delta HR_{Tstart}) \div (period\ duration)$. For the $\dot{V}O_2$ measurement periods (n=15), data were averaged over the duration of the measurement period and analyses consequently.

5.3.6 Statistical analysis

Agreement on ΔHR_T estimates from the two methods (over the entire workday and per phase), was assessed using limits of agreement analysis (LoA) as described by Bland-Altman (Bland & Altman, 1986, 1995, 1999). Comparison of $\dot{V}O_2$ estimates to measured $\dot{V}O_2$ was also performed using LoA. Prediction bias was calculated as the mean difference between ΔHR_T estimates (or estimated $\dot{V}O_2$ minus measured $\dot{V}O_2$) from the two methods and 95% limits of agreement (LoA) as ± 2×standard deviation (SD) of the differences. 95%LoA were computed on differences (in bpm and bpm/min for rate variables) for ΔHR_T and on differences and relative differences for $\dot{V}O_2$ (ml/kg/min and % of averages)(Nevill & Atkinson, 1997; Dewitte *et al.*, 2002). A paired t-test was used to determine if mean ΔHR_T bias over the entire workday or mean $\dot{V}O_2$ over the duration of the measurement period significantly departed from 0. A repeated measures ANOVA was performed using a mixed model to take into account the repeated measurements of the phases on each subject for the work and rest periods separately. Limits of Agreement were obtained using output results from the ANOVA (Bland & Altman, 1999). Post hoc analysis using dependent t-tests was used to determine if mean bias significantly departed from 0. A similar statistical analysis process was applied to assess agreement between estimated $\dot{V}O_2$ and measured $\dot{V}O_2$ for each method.

Heteroskedasticity, that is, non-constant bias or non-constant variance over the range of measurements, was assessed using Pearson’s r correlation coefficient on biases against averages and on absolute residuals against averages (Nevill & Atkinson, 1997; Bland & Altman, 1999; Dewitte et al., 2002). Statistical significance level α=0.05 was used for all tests. All analyses were carried out with SAS University Edition (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA). Limits of agreement

were computed using Microsoft Excel. Pearson r correlation coefficients and descriptive statistic were computed with SAS JMP version 10 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA).

5.4 Results

5.4.1 Thermal HR component

Duration of the workday averaged 477 min (SD: ± 86 min; range: 150 – 583 min). Unreliable core temperature data were observed in the beginning of the workday in most of the subjects (n= 19 out of 30), which made ΔHR_T estimation per Kampmann et al.'s method impossible for an average time duration of 211 min (SD: ± 92 min; range: 100 – 369 min) in the subjects' data affected. This amounted to an average 42% (SD: ± 16%; range: 21 – 65 %) loss of data, leaving usable data for a remaining workday duration of 356 min on average (SD: ± 131 min; range: 150 – 570 min) for the 30 subjects. Table 5.2 presents the results averaged over the usable duration data. The paired-t test on ΔHR_T showed no significant difference between methods (t_{29} = -0.61, p-value = 0.55). Limits of Agreement indicated an acceptable level of accuracy. The largest difference in ΔHR_T between the two methods for the same individual was about 4 bpm. No heteroscedasticity were found on the biases against averages nor on the residuals against averages, indicating that the Limits of Agreement were constant over the range of measurements.

Table 5.14: Core temperature measurement, ΔHR_T estimations using the two methods, and LoA analysis results average over the entire workday.

Variable	Workday	
N	30	
Duration (min)	356 ± 131	(150 – 570) [a]
Core temperature (°C)	37.64 ± 0.28	(37.04 - 38.12)
ΔHR_T Vogt et al. (bpm)	14.8 ± 9.0	(0 – 33.9)
ΔHR_T Kampmann et al. (bpm)	14.5 ± 9.0	(0 – 33.3)
Bias ± 95%LoA (Kamp – Vogt)	-0.23 ± 4.2	

[a] mean ± standard deviation (range)

A total of n=129 work and rest phases were counted during the n=30 workdays from which n=21 phases were eliminated from the dataset due to unreliable core temperature measurements. Two subjects had no observable ΔHR_T over the workday with either method while the other subjects had observable ΔHR_T with both methods. The n=7 phases, where the two subject had no ΔHR_T, were removed from the dataset leaving a total of 101 usable work and rest phases. Table 5.3 presents the core temperature measurement results, the ΔHR_T estimations using the two methods, and the results from the LoA analysis. On average, core temperature increased from 37.42 ˚C at the beginning of a work period and increased at a rate of 0.008 ˚C/min to reach 37.92 ˚C at the end. An average 24 bpm HR thermal component was observed at the end of the work period with both methods. The Kampmann et al. method found a statistically significant lower ΔHR_T at the start of a work period which translated to a significant variation and rate of change in ΔHR_T over the work period between the two methods. Similar differences were observed with the end of the rest period.

Table 5.15: Core temperature measurement, ΔHR_T estimations using the two methods, and LoA analysis results for the 101 usable work and rest phases.

Variable	Work	Rest
N	101	101
Duration (min)	77 ± 45 (12 - 226) [a]	10.8 ± 2.5 (4.5 - 25.6)
Core temperature (°C)		
Mean	37.71 ± 0.33 (37.02 - 38.7)	37.82 ± 0.35 (37.08 - 38.84)
Start	37.42 ± 0.39 (36.6 - 38.52)	37.92 ± 0.35 (37.16 - 38.92)
End	37.92 ± 0.35 (37.16 - 38.92)	37.67 ± 0.35 (36.97 - 38.65)
Variation	0.5 ± 0.3 (-0.31 - 1.38)	-0.25 ± 0.14 (-0.66 - 0.12)
Rate (°C/min)	0.008 ± 0.006 (-0.003 - 0.028)	-0.024 ± 0.014 (-0.061 - 0.012)
ΔHR_T Vogt et al. (bpm)		
Mean	16.4 ± 9.4 (0 - 42)	21.6 ± 11.1 (0 - 44.8)
Start	9.8 ± 10.4 (0 - 42)	23.6 ± 11.6 (0 - 47.8)
End	23.6 ± 10.4 (0 - 47.8)	17 ± 10 (0 - 42)
Variation	13.8 ± 10 (-15.3 - 41.1)	-6.8 ± 4.1 (-24.8 - -0.1)
Rate (bpm/min)	0.23 ± 0.19 (-0.15 - 1.03)	-0.62 ± 0.34 (-2.28 - -0.02)
ΔHR_T Kampmann et al. (bpm)		
Mean	17.4 ± 9.7 (0 - 40.2)	20.2 ± 11.3 (0 - 45)
Start	8.7 ± 9.2 (0 - 37.2)	23.9 ± 11.4 (3.6 - 55)
End	23.9 ± 11.4 (3.6 - 55)	15.3 ± 10.5 (0 - 40.4)
Variation	15.2 ± 9.8 (-13.5 - 45.5)	-8.6 ± 6.1 (-44.7 - 2.2)
Rate (bpm/min)	0.26 ± 0.22 (-0.13 - 1.52)	-0.82 ± 0.62 (-4.12 - 0.22)
Bias ± 95%LoA (Kamp – Vogt)		
Mean	1 ± 10.8	-1.4 ± 11 *
Start	-1.2 ± 10.2 *	0.2 ± 12.2
End	0.2 ± 12.2	-1.7 ± 13 *
Variation	1.5 ± 11.7 *	-2 ± 11.2 *
Rate (bpm/min)	0.03 ± 0.26 *	-0.215 ± 1.078 **

[a] mean ± standard deviation (range)
* paired-t test significant at $p < 0.05$
** paired-t test significant at $p < 0.0001$

5.4.2 Thermal Cardiac Reactivity

Figure 5-2 displays all thermal cardiac reactivity (TCR) functions derived from Kampmann et al.'s method (grey lines). Most functions displayed a single TCR transition point (n=25 out of 30) representing cases where ΔHR_T increases at single rate. For n=3 functions, two TCR transition points were observed while for n=2 functions no transition point was found indicating no HR thermal component over the entire day. Vogt et al.'s method also resulted in no HR thermal component for these two instances.

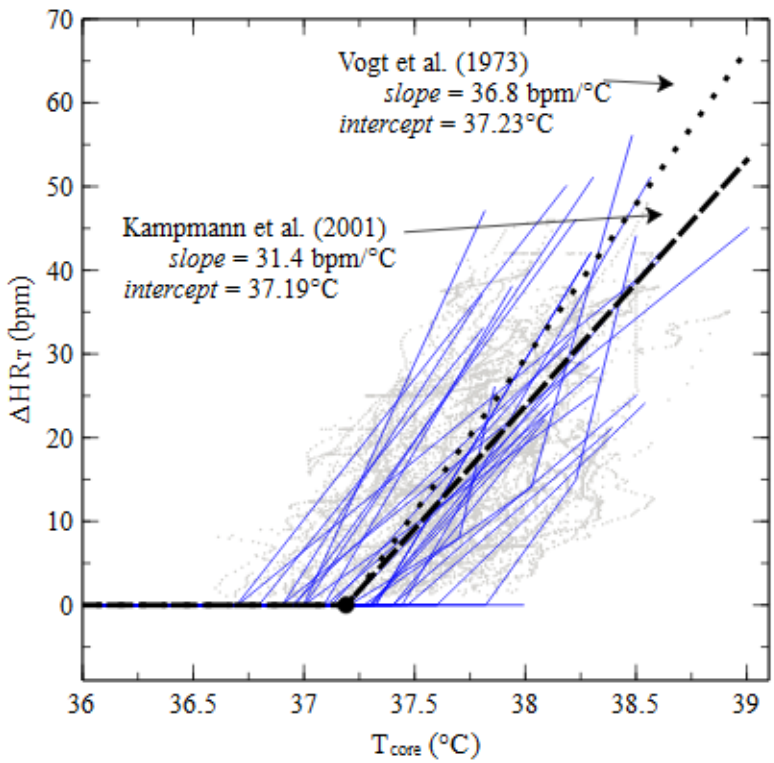

Figure 5-9: Line chart of all Kampmann's thermal cardiac reactivity functions (blue lines), average slope (dashed) and average TCR transition point (round marker). Background: Scatter plot of all minute-by-minute ΔHR_T from Vogt et al. method against Tcore (grey dot) and resulting average TCR function (dotted)

The average first TCR transition point, representing the average core temperature at which ΔHR_T starts to rise, was 37.19 °C (SD: ± 0.3 °C, range: 36.7 - 37.82 °C), whereas the average slope from that first TCR point describing the rate of increase or decrease in ΔHR_T, was 31.4 bpm/°C (SD: ± 9.8 bpm/°C, range: 16.1 – 57.5 bpm/°C) or 0.035 °C/bpm (SD: ± 0.011 °C/bpm, range: 0.017 –

0.062). The “average” thermal cardiac reactivity function is displayed in Figure 5-2 as a dashed line. For the n=3 functions where two TCR transition points were found the rate changed from 92.3 to 112.5 bpm/°C (0.009 to 0.011 °C/bpm) between core temperatures of 37.7 and 38.23 °C.

The minute-by-minute ΔHR_T estimated from the Vogt et al. method are displayed in Figure 5-2 (grey dots). Only the $\Delta HR_T > 0$ are displayed. The scatter plot appears to reflect Kampmann et al.’s TCR functions. An average TCR function based on Vogt et al.’s ΔHR_T (Figure 5-2, dotted line) was obtained using a random model:$\cdot Tc\ (°C) = 37.23 + 0.027 \times \Delta HR_T$ (n = 8826, $r^2 = 0.25$, SEE = 0.23°C, p-value < 0.0001). Thus, the Vogt et al method resulted in an average TCR point similar to that obtained with the Kampman et al. method (37.23 vs. 37.19 °C) but with a slightly steeper slope (1/0.027 = 36.8 bpm/°C vs. 31.4 bpm/°C).

Figure 5-3 displays the variation in ΔHR_T during the work periods (grey markers) and during the ensuing rest period (white markers) for all n=101 phases of variation in core temperature for the two methods (top: Vogt et al., bottom: Kampmann et al.). The scatter plot for the Kampman et al. method depicts a clear linear relationship in both work and rest data. Taken separately, a regression analysis gives a significant positive linear relationship of $\Delta HR_T = 0.41 + 35.8 \times T_c$ ($r^2 = 0.67$, SEE = 3.53, p < 0.0001) for the rest period data and $\Delta HR_T = 1.6 + 27.5 \times T_c$ ($r^2 = 0.7$, SEE = 3.53, p < 0.0001) for the work period data. In both regressions the intercept were not significant (p = 0.57 for rest data, p = 0.13 for work data). The scatter plot for the Vogt et al. method also shows a linear relationship in work and rest data. Taken separately, a regression analysis gives a significant positive linear relationship of $\Delta HR_T = -4.6 + 8.3 \times T_c$ ($r^2 = 0.08$, SEE = 4.0, p = 0.004) for the rest period data and $\Delta HR_T = 1.3 + 25.1 \times T_c$ ($r^2 = 0.57$, SEE = 6.6, p < 0.0001) for the work period data. The intercept for the rest data was significant (p < 0.0001) but not for the work data. Results from the regression on all 202 work and rest period data points are presented in Table 5.4.

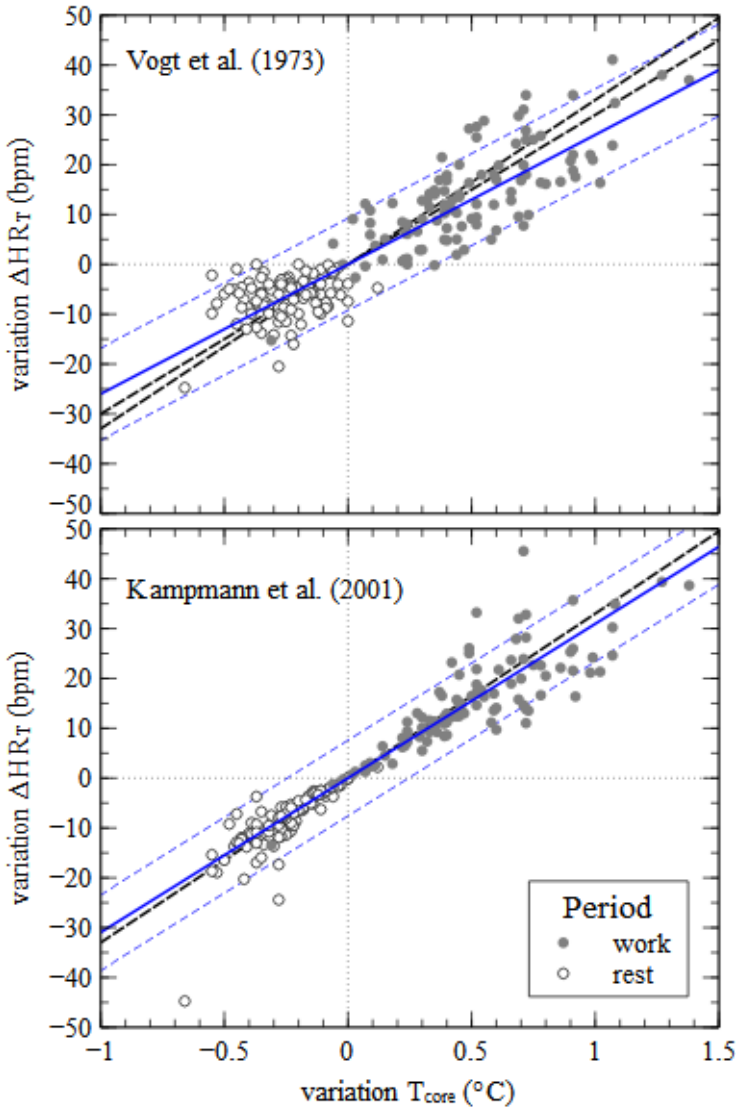

Figure 5-10: Variation in ΔHR_T against variation in Tcore during the work and rest periods for all n=101 phases for the two methods (top: Vogt et al., bottom: Kampmann et al.). Blue line represents the regression computed on all 101 phase datapoints with unilateral 1.645 × SEE confidence interval (blue dotted). Black dotted lines represent the average thermal cardiac reactivity reported by ISO 8996:2004 (33 bpm/°C) and Meyer et al. (2001) (30 bpm/°C).

Table 5.16: Regression on the variation of ΔHR_T against Tcore for all 202 work and rest periods (n=101 work periods and n=101 rest periods) for the two methods.

Parameter	Vogt et al. (1973)	Kampmann et al. (2001)
Intercept (bpm)	0.36 ± 0.42 (p = 0.39) [a]	-0.48 ± 0.34 (p = 0.16)
Slope (bpm/°C)	25.8 ± 0.9 (p < 0.0001)	31.1 ± 0.73 (p < 0.0001)
r^2	0.80	0.90
SEE *	5.7	4.61

[a] Parameter estimate ± standard error (p-value)
* standard error of estimate

5.4.3 Work metabolism prediction

Table 5.5 shows the measured and estimated physiological responses during the phase where work $\dot{V}O_2$ was measured. The two methods yielded very similar ΔHR_T and $\dot{V}O_2$ estimations during work and rest. The work $\dot{V}O_2$ estimation biases were smaller than 2.5% and comparable between the two methods whereas for the rest period data, the biases were slightly larger (2.9 and 3.1%). LoA were smaller for the Vogt et al. method for both work and rest data. As expected, use of the uncorrected (raw) HR to estimate $\dot{V}O_2$ yielded a substantial error, particularly for rest $\dot{V}O_2$ estimation (Dubé *et al.*, 2014[5]). Paired t-tests were significant in work and rest data (results not reported). A significant relationship was found on the biases (raw HR) against averages in the work data (biases = -4.7 + 0.44 averages, r^2 = 0.37, p-value < 0.0001) and in the rest data (biases = -5.8 + 1.25 averages, r^2 = 0.84, SEE = 1.8, p-value < 0.0001). The increase in prediction bias with higher $\dot{V}O_2$ can be explained mostly by the relationship found between biases and ΔHR_T with both methods in work data (Vogt et al.: bias = -0.06 + 0.43× ΔHR_T, r^2 = 0.76, SEE = 2.0, p-value < 0.0001; Kampmann et al.: bias = 0.6 + 0.37× ΔHR_T, r^2 = 0.72, SEE = 2.2, p-value < 0.0001) and rest data (Vogt et al.: bias = 0.9 + 0.39× ΔHR_T, r^2 = 0.81, SEE = 2.0, p-value < 0.0001; Kampmann et al.: bias = 1.7 +

[5] cf. Chapitre 3, section 3.4.3

0.36× ΔHR_T, r^2 = 0.76, SEE = 2.2, p-value < 0.0001). Use of the corrected HR to estimate $\dot{V}O_2$ yielded no heteroscedasticity in the biases (or relative biases) against averages, nor in residuals against averages when HR was corrected with either methods; bias and 95%LoA were constant throughout the range of measurement. Paired t-tests were not significant (p > 0.05, results not reported).

Table 5.17: Mean physiological responses during the work and rest periods.

	Work N = 15 Measured $\dot{V}O_2$ = 20.4 ± 4.5 ml/kg/min			**Rest** N = 13 Measured $\dot{V}O_2$ = 7.1 ± 1.5 ml/kg/min		
	Raw	Vogt et al.	Kamp.	Raw	Vogt et al.	Kamp.
HR	117 ± 7 [a]	-	-	90 ± 5	-	-
Corrected HR	-	105 ± 5	105 ± 4	-	72 ± 2	73 ± 2
ΔHR_T	-	12.8 ± 4.8	12.7 ± 4.1	-	18.2 ± 1.5	17.5 ± 2.2
Estimated $\dot{V}O_2$	25.8 ± 6.7	20.9 ± 4.8	20.8 ± 4.1	15.1 ± 5.2	7.3 ± 1.5	7.4 ± 2.2
Bias ± 95%LoA [b]						
(ml/kg/min)	5.4 ± 7.8	0.5 ± 4.4	0.4 ± 5.7	8 ± 8.6	0.2 ± 2.4	0.3 ± 3.6
(%)	22.5 ± 29.2	2.2 ± 21.6	2.4 ± 27.5	67.4 ± 52.5	2.9 ± 34.3	3.1 ± 42

[a] mean ± standard deviation
[b] Bias ± 2 × s.d. of difference

5.5 Discussion

Two different methods to assess the HR thermal component (ΔHR_T) —the method proposed by Vogt et al. (1973) and the method proposed by Kampmann et al. (2001)— so as to improve work metabolism estimation from HR measurements during work were compared. The Vogt et al. method is simpler in that it requires only the measurement of HR during imposed recovery pauses distributed along the workday. Since workers usually take rest pauses at different moments during the day the implementation of this method may not require much change to the regular work schedule. On the other hand the Kampmann et al. method requires measurement of body core temperature during a complete workday, thereby requiring the purchase, use and maintenance of specialized instrumentation that is more expensive than the widely available and cheaper HR monitors. Our experience shows that core temperature measurement requires that the telemetric pill be ingested several hours before the data collection otherwise significant data loss is to be expected. A good strategy would be to meet the subjects the day before the measurements, which

complicates the data collection significantly compared to meeting the subject only once, that is, the day of the data collection. Also, core temperature measurement is prone to data loss owing to perturbations (e.g., the subject drinks a lot of liquid at once) and instrument malfunction. Another good strategy would be to use rectal temperature as Kampmann et al. (2001) originally did since it is less prone to perturbations (Paul, Ducharme, Mandzak, Limmer & Frim, 1999). However, workers volunteering for rectal temperature measurement may be more difficult to find than for the telemetric pill. On the other hand, if perturbations can be minimized our results indicate that the telemetric pill is a valid alternative to a rectal probe. The main advantage of Kampmann et al. method is that it does not require the subject to take carefully organized rest pauses during the workday as it is the case in Vogt et al. method (i.e., sitting during 10 min and not talking, not smoking, not drinking, not fidgeting, etc.). This may be a significant advantage where work is difficult to interrupt. However, one must still ensure that enough quality rest breaks be taken throughout the workday otherwise a ΔHR_T overestimation is likely to occur with the Kampmann et al. method. For instance, in this study too few breaks of too short duration besides the lunch break, were taken spontaneously by some of the subjects. In these cases, the recovery profile would show an incomplete HR motor component recovery. In such cases, it was not possible to apply the Kampmann et al. method. The 10-min rest breaks already programmed during the day for the Vogt et al. method data collection still allowed the use of the Kampmann et al. method in such cases. From a data preparation point of view, the methods are equivalent in that the data needs to be plotted and examined carefully before ΔHR_T can be estimated. In varying workload conditions however, the Vogt et al. method may be more difficult to implement since the authors of the method do not offer much guidance in these conditions where it becomes apparent that the linear increase in ΔHR_T assumption is inadequate.

Despite their limitations, results show that the two methods yielded very similar results regarding work $\dot{V}O_2$ estimation from work HR corrected for ΔHR_T; biases were smaller than 2.4% for work data and smaller than 3.1% for rest pause data. Thus, the overestimation associated with using raw HR measurement was significantly reduced with both methods. The limits of agreement for the work data were slightly smaller with the Vogt et al. (1973) method at less than 22% indicating slightly less variability in $\dot{V}O_2$ estimation in with this method. Despite that the Vogt et al. method is not as well suited as the Kampmann method to predict ΔHR_T in conditions of varying workload, it appears that the former performed slightly better overall in estimating brushcutting work $\dot{V}O_2$.

The regression analysis results indicated that a 1 ˚C core body temperature corresponded to an average ΔHR_T of 26.2 bpm above rest level with the Vogt et al. method, and 31 bpm with the Kampmann et al. method. These figures are to be compared with the 33 bpm value obtained in laboratory conditions proposed by (Vogt & Metz, 1981) and reported in (ISO 9886:2004). Meyer et al. (2001) cite a number of laboratory studies (e.g., in a sauna) reporting corresponding figures ranging from 22.7 bpm for a 1 ˚C increase in oral temperature to 36 bpm for a 1 ˚C increase in rectal temperature. Our results, based on actual forest work conditions and core temperature thus compare favorably to the range of ΔHR_T values reported in the literature. To protect 95% of the worker population from a 1 ˚C core body temperature increase, the corresponding figures are 17 bpm and 23 bpm, for the Vogt et al. and Kampmann et al. methods, respectively. These figures are to be compared with the 21 bpm figure reported by Meyer et al. (2001) for oral temperature measurements. To protect 95% of the worker population, these increases can be counted from a core temperature point of 36.7 ˚C, which represents the 5th percentile thermal cardiac reactivity transition point (Figure 5-2).

One limitation of this study is the small number of subjects (n=15) for which HR, core temperature and $\dot{V}O_2$ measurements were available. Quality data for these variables is difficult and expensive to obtain in actual work environments, especially outdoors where instruments are prone to malfunction owing to varied difficult conditions (e.g., bad weather, worker lack of care or accidental movements, environmental factors). Nonetheless, such studies are needed to develop better monitoring models and tools for the practitioner.

5.6 Conclusion

This study shows the method proposed by Vogt et al. (1973) to assess the HR thermal component (ΔHR_T) to result in a slightly better overall work $\dot{V}O_2$ estimation from HR data collected during brushcutting work than the Kampmann et al. (2001) method. Since the former is much simpler to implement in many work environments it will likely be a practitioner's first choice. This study also shows that a 1 ˚C increase in body core temperature resulted in a corresponding average 26 to 31 HR increase above rest levels depending on the method. From these results, the practitioner can easily monitor a worker's HR and determine at what increase above resting level work should be stopped and a recovery pause taken to avoid the risk of hyperthermia. In cases where the Vogt et al. method cannot be applied adequately the method from Kampmann et al. appears as the only and valid alternative.

5.7 Acknowledgements

The authors wish to thank Isabelle Auger for her contribution to the research design and guidance in the statistical analyses. The authors wish also to thank Dr. Luc Lebel for his assistance and technical advice regarding forest work operations, and Dr. Mario Leone for his technical advice with oxygen consumption measurement with the K4b^2. This work was supported by the Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs; the Fonds de recherche du Québec - Nature et technologies (FRQNT); and the Natural Science and Engineering Research Council of Canada (NSERC), through the Canada Research Chair in Ergonomics of Polytechnique de Montréal.

CHAPITRE 6 : DISCUSSION GÉNÉRALE

La présente thèse a permis d'élucider certains aspects méthodologiques et pratiques auxquels le praticien est confronté lorsque le métabolisme de travail est étudié par le biais de la mesure de la fréquence cardiaque de travail, en particulier lorsque le travail implique une combinaison de charge physique et de contrainte thermique conséquente pouvant représenter un risque pour la santé et la sécurité du travailleur.

Les données utilisées dans cette recherche ont été recueillies à travers quelques études réalisées en milieu de travail réel ayant porté sur différentes facettes de la productivité et de la charge physique de travail des travailleurs forestiers. Des données recueillies lors d'une étude en laboratoire portant sur la validation du step-test de Meyer et Flenghi (1995) ont aussi été utilisées. Les études en milieu de travail réel (c.-à-d., de type terrain) sont toujours plus compliquées à mener que les études en laboratoire étant donné que le chercheur n'a pas l'entier contrôle sur l'ensemble des variables qu'il étudie, non plus que sur celles ayant un impact possible sur les premières (variables confondantes). Néanmoins, lorsque la collecte de données est réussie les résultats ont habituellement une plus grande validé de face ("face validity") et offrent un meilleur potentiel de généralisation.

Le premier objectif de cette thèse visait à caractériser l'erreur d'estimation du métabolisme de travail à partir de la fréquence cardiaque selon qu'on tient compte ou non de l'effet de la contrainte thermique sur la mesure de la fréquence cardiaque par la méthode de Vogt et al. (article 1, chapitre 3). Les résultats montrent l'importance d'en tenir compte. La précision de l'estimation dépend largement du degré d'élévation de la fréquence cardiaque (ΔHR_T) d'origine thermique. Ne pas en tenir compte peut mener à une surestimation substantielle de la $\dot{V}O_2$, surestimation d'autant plus grande que le degré d'élévation est grand. La correction de la Fréquence cardiaque par la méthode de Vogt a permis de corriger la surestimation due à l'effet de la chaleur et d'obtenir une précision de l'ordre de moins de 3% en moyenne, en considérant les limites de confiance à 95%. Tout au plus, la précision de l'estimation de la $\dot{V}O_2$, chez un seul sujet, peut atteindre ±20%, un seuil jugé acceptable. Cette étude a permis également de constater la validité du step-test de Meyer et Flenghi (1995) pour obtenir la relation HR-$\dot{V}O_2$ du sujet, et ce, lorsque celui-ci est effectué dans des conditions s'écartant des conditions « normales », c.-à-d. effectuées dans des ambiances thermiques variées alors que le sujet porte ses vêtements de travail. Ce test demeure un test simple à administrer en milieu de travail et suffisamment facile pour le travailleur dont on ne connaît pas la santé

cardiovasculaire. Les résultats démontrent également la robustesse de la méthode de Vogt et al. pour évaluer l'élévation de la fréquence cardiaque d'origine thermique. Le second objectif de la thèse visait à quantifier l'erreur d'estimation du métabolisme de travail et de la capacité cardiorespiratoire associée à la manipulation de différents aspects méthodologiques et pratiques reliés à l'établissement de la relation HR-$\dot{V}O_2$ par un test à l'effort sous maximal (article 2, chapitre 4). Un troisième objectif était de comparer les deux approches publiées à ce jour pour estimer l'élévation de la fréquence cardiaque d'origine thermique quant à l'estimation du métabolisme de travail (article 3, chapitre 5). Les résultats montrent que les méthodes de Vogt et al. et de Kampmann et al. rendent une évaluation relativement similaire de l'élévation d'origine thermique moyenne durant la journée entière de travail et durant les périodes de travail. D'autres études sont nécessaires afin de caractériser davantage la similitude ou non de ces méthodes. En effet, chez certains sujets, les méthodes peuvent donner une évaluation significativement différente de l'élévation d'origine thermique comme en font foi les biais du tableau 5.3, notamment lors du repos. Néanmoins, tout comme la méthode de Vogt et al., la méthode de Kampmann et al. a permis de corriger la surestimation du métabolisme de travail associée à une élévation de la fréquence cardiaque d'origine thermique, mais dans une moindre mesure. Le professionnel ou le chercheur confronté à une situation où la méthode de Vogt et al. ne pourrait être appliquée (c.-à-d.. où les pauses ne peuvent être effectuées) peut se tourner vers la méthode de Kampmann pour évaluer l'élévation d'origine thermique et, ainsi, obtenir une estimation du métabolisme de travail acceptable. Par contre, il doit porter une attention particulière à la mesure de la température corporelle nécessaire à l'application de la méthode de Kampmann afin de minimiser les pertes de données associées à l'instrumentation parfois capricieuse. La méthode de Vogt et al. demeure plus simple et facile d'application. Nous sommes les premiers à comparer ces méthodes et les premiers à appliquer la méthode de Kampmann et al dans un contexte de travail réel.

Les difficultés vécues lors des différentes collectes de données ont été nombreuses. En particulier, l'enregistrement de la température corporelle et la mesure de la consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$) sont associés à la perte de beaucoup de sujets et de journées de mesures. Chaque mesure prise individuellement est sujette à des difficultés. Le fait d'en réussir trois en simultané (température corporelle, consommation d'oxygène, fréquence cardiaque) dans un environnement aussi hostile que la forêt constitue presque un exploit en soi. Ainsi, en ce qui a trait à la mesure de la charge physique de travail, seulement 48% de l'ensemble des journées de mesure des différentes études

ont pu être utilisées (pour les deux premiers articles). De même, en ce qui a trait à la mesure de la température corporelle, nécessaire à l'application de la méthode de Kampmann et al. (2001), seulement 24% des journées de mesures étaient utilisables (pour le troisième article). En comparaison, dans l'étude de laboratoire 26 des 30 sujets ou journées de mesures disponibles ont pu être utilisées aux fins de la présente thèse (pour le second article), soit un taux de succès de 86%. Malgré ces difficultés, un nombre conséquent de sujets et de mesures ont permis de construire la base de données finale constituée de 41 travailleurs pour les deux premiers articles et de 30 sujets pour le troisième, soit des tailles d'échantillon largement supérieures en nombre et en qualité aux études en physiologie du travail habituellement publiées dans lesquelles des échantillons de 10 à 20 étudiants d'université sont typiquement utilisés.

Il est utile de rappeler les principaux résultats de cette recherche, d'en présenter le lien avec les objectifs de cette recherche et l'intérêt du point de vue du praticien :

a) **Le praticien intéressé à évaluer le métabolisme de travail au moyen de la fréquence cardiaque de travail doit tenir compte de l'élévation de la fréquence cardiaque d'origine thermique ($\boldsymbol{\Delta HR_T}$)** pour obtenir une évaluation précise du métabolisme de travail. En prenant en compte ΔHR_T, le praticien peut s'attendre à une erreur d'estimation maximale de ±25% si l'évaluation est faite sur un seul individu, et d'au plus ±4% pour un groupe de sujets (>40 sujets)(cf. Table 4.8 – R5), lorsque la fréquence cardiaque seule est mesurée durant le test. Une erreur d'estimation sensiblement plus faible peut-être obtenue si la $\dot{V}O_2$ est mesurée durant le test, moyennant un alourdissement considérable de la collecte de données, ainsi que la prise en compte de certaines précautions (voir point (c) ci-bas). Pour obtenir une erreur d'estimation moyenne d'au plus ±10%, le praticien doit obtenir des mesures chez 7 sujets. Il est important de rappeler qu'en moyenne, l'évaluation pour un individu ne diffèrera pas de plus de 1% de la valeur réelle, soit moins de 1 ml/kg/min (individu et groupe). Cette thèse est la première à quantifier l'erreur d'estimation du métabolisme de travail par la fréquence cardiaque en tenant compte de ΔHR_T et ce avec des données obtenues en milieu de travail réel. (Objectif 1)

b) **Ne pas tenir compte de $\boldsymbol{\Delta HR_T}$ peut mener à une surestimation substantielle du métabolisme de travail.** La surestimation est directement proportionnelle à ΔHR_T; une forte corrélation a été trouvée entre ΔHR_T moyenne durant le travail et l'erreur d'estimation

de la $\dot{V}O_2$ (en ml/kg/min) (cf. section 3.4.3). Chaque tranche de 10 bpm de ΔHR_T occasionne une surestimation de 3,4 ml/kg/min, soit l'équivalent de 1 MET, ce qui est considérable. Le MET est l'unité métabolique représentant le rapport de la dépense énergétique associée à une activité à celui du métabolisme basal. Une surestimation de 1 MET équivaut donc à une surestimation d'une fois le métabolisme basal. Cette thèse est la première à établir une relation entre ΔHR_T et l'erreur d'estimation de la $\dot{V}O_2$. (Objectif 1)

c) **La relation HR-$\dot{V}O_2$ établie en milieu de travail à l'aide du step-test de Meyer et Flenghi (1995) permet une estimation précise du métabolisme de travail et de la capacité cardiorespiratoire.** La précision de l'estimation du métabolisme de travail ou de la capacité cardiorespiratoire n'est pas affectée si le test est réalisé dans des conditions hors laboratoire (ex. à l'extérieur, sujet vêtu de vêtements de travail), ce qui diminue la complexité de la collecte de données pour le praticien. En ce qui a trait à l'établissement de la relation HR-$\dot{V}O_2$, les résultats suivants sont intéressants pour le praticien (Objectif 2):

i. *Il n'est pas requis de mesurer la $\dot{V}O_2$ durant le test à l'effort (step-test).* En fait, la mesure de la $\dot{V}O_2$ n'est pas souhaitable. Certes, l'erreur d'estimation est un peu moindre lorsqu'on mesure, mais le coût de mise en œuvre est beaucoup plus important et certaines précautions doivent être prises en compte. La relation HR-$\dot{V}O_2$ obtenue en mesurant la $\dot{V}O_2$ est relative à l'appareil de mesure utilisé. Si l'appareil rend une mesure différente de la $\dot{V}O_2$ par rapport à d'autres appareils (ex. K4b^2 vs. MOXUS) ou mal calibré, l'estimation du métabolisme de travail ou de la capacité cardiorespiratoire ne permettra pas une comparaison des valeurs obtenues, par exemple, aux valeurs publiées dans la littérature ou mènera à une estimation erronée. Le praticien doit donc s'assurer que les mesures faites avec l'appareil utilisé soient valides par rapport à des mesures de référence, ce qui nécessite d'effectuer des tests de mesure dont un praticien aimerait vraisemblablement se passer. En utilisant la formule de prédiction de la $\dot{V}O_2$ développée ici, le praticien peut être assuré d'obtenir une estimation qu'il peut comparer à la littérature. Avec cette formule, le praticien peut s'attendre à obtenir une erreur d'estimation du métabolisme de travail de ±25% (contre ±20% si la mesure est prise durant le test) pour des mesures faites sur un seul individu et de ±4% pour un groupe (>40

sujets)(contre ±3% si la mesure est prise). Pour obtenir une erreur d'estimation moyenne d'au plus ±10%, le praticien doit obtenir des mesures chez 7 sujets (contre 2 à 3 sujets si la mesure est prise). En ce qui a trait à l'estimation du MAC, l'erreur d'estimation est similaire (±22% pour un individu et ±4% pour un groupe).

ii. *Il ne faut pas tenir compte de* ΔHR_T si une telle composante est observée au cours de la récupération suivant le test à l'effort, c'est-à-dire, si la fréquence cardiaque de repos n'est pas encore atteinte à la 4e minute après le début de la pause de récupération suivant le test. Tenter de prendre en compte cette composante en corrigeant les valeurs de fréquence cardiaque durant le test mène à une erreur d'estimation importante autant pour le métabolisme de travail que pour la capacité cardiorespiratoire (cf. R2 et R6 dans les tables 4.6 et 4.8).

iii. *L'équation 220-âge peut être utilisée en toute confiance.* Cette équation de prédiction de la fréquence cardiaque maximale d'une personne est souvent citée dans la littérature, mais plusieurs autres équations sont rapportées comme étant plus valides. Dans cette thèse, l'utilisation de cette équation ou d'une autre plus récente et considérée comme étant plus valide n'a produit aucune différence pratique sur l'estimation de la capacité cardiorespiratoire.

d) **L'approche proposée par Vogt et al. (1970, 1973) apparaît comme la plus simple et la moins coûteuse à mettre en œuvre** comparativement à l'approche proposée par Kampmann et al. (2001) qui nécessite de mesurer sur toute la journée la température corporelle centrale, une mesure difficile à réaliser sans perte de données. L'approche de Vogt et al. offre l'avantage de permettre l'estimation de ΔHR_T sur une partie de la journée de travail, par exemple pour une tâche particulière jugée problématique. Il s'agit dans ce cas de prévoir une pause de 10 minutes avant la période de travail d'intérêt et après. (Objectif 3)

e) **L'approche proposée Vogt et al. (1970, 1973) permet d'obtenir un bon indicateur de l'astreinte thermique.** La valeur de réactivité cardiaque thermique (c.-à-d. la variation de ΔHR_T par degré de température corporelle centrale) établie ici recoupe celles établies en laboratoire (ISO 8996:2004) et en milieu de travail avec la température buccale (Meyer et al., 2001). Les résultats de cette thèse proposent une limite de 15 bpm afin d'assurer une

astreinte thermostatique sécuritaire (< 1°C) chez 95% des travailleurs, tandis que Meyer et al. 2001) proposent 20 bpm. Le praticien peut ainsi formuler des recommandations ou déterminer des durées limites d'exposition (DLE) qui n'induisent pas une astreinte thermique excessive. Cette approche offre l'avantage d'être indépendante de l'environnement et de l'isolement vestimentaire et donc plus simple à appliquer que certains modèles (ex., PHS de ISO 7933:2004). (Objectif 3)

6.1 Procédure générale revisitée

Pour estimer le métabolisme de travail ou la capacité cardiorespiratoire à partir de la fréquence cardiaque, le praticien peut suivre la procédure décrite ci-dessous. Cette procédure intègre les résultats de la présente thèse ainsi que l'expérience acquise durant les collectes de données. La procédure suppose que le praticien est intéressé à obtenir une évaluation du métabolisme de travail pour une journée de travail entière; il désire obtenir un profil de fréquence cardiaque corrigée de ΔHR_T sur toute la journée. La procédure suppose également qu'il utilise le step-test de Meyer et Flenghi (1995) pour établir la relation HR-$\dot{V}O_2$ pour chacun des travailleurs participant à son étude. Idéalement, le step-test devrait être administré avant le début de la journée de travail, typiquement le matin, alors que le sujet n'a accumulé aucune fatigue.

Notons que la procédure peut être adaptée pour évaluer le métabolisme d'une activité de travail particulière ayant lieu à un moment précis de la journée de travail. Dans ce cas, il s'agit simplement de prévoir une pause d'au moins 30 minutes avant le début de la période de travail d'intérêt pour administrer le step-test si cela n'a pas été possible avant le début de la journée de travail. Une pause de 30 minutes, si possible en ambiance neutre, permettra d'éliminer dans la mesure du possible toutes traces d'astreintes cardiovasculaires liée au stress psychologique (ΔHR_N), au stress lié aux composantes résiduelles (ΔHR_ε), à une activité musculaire dynamique (ΔHR_M) ou statique (ΔHR_S), afin d'obtenir une fréquence cardiaque de repos (HR_0) la plus représentative de celle du début de quart de travail. Comme la fréquence de repos est la base au-delà de laquelle les élévations de la fréquence cardiaque sont interprétées, il est utile de l'établir correctement. En moyenne, une pause de 10 minutes permettra de récupérer de 18,6 bpm d'astreinte thermique (selon le taux de récupération moyen observé durant le repos - table 5.3). Bien que cela soit peu probable, il demeure possible qu'une astreinte résiduelle liée à une contrainte thermique importante lors d'une activité de travail précédente soit toujours présente à la fin de la pause. Le praticien pourra dans ce cas

allonger la durée de la pause s'il le juge utile ou simplement tenir compte dans ses analyses qu'une valeur ΔHR_T non nulle était présente au début de la période de travail.

Pour utiliser la procédure proposée plus bas, le praticien doit prévoir les équipements suivants :

1. Le banc ergonomique;

   Note : Il est important que la hauteur des marches soit conforme aux indications de Meyer et Flenghi (1995). Les spécifications de construction du banc ergonomique sont clairement indiquées dans la publication de ces auteurs.

2. Un métronome ou un moyen d'indiquer au sujet la cadence de montée-descente (60 pas/min);

3. Un cardiofréquencemètre;

4. Un ruban à mesurer pour relever la taille du sujet;

5. Un support quelconque (ex. carnet de notes) pour noter l'âge et la taille du sujet. Le poids peut aussi être demandé au sujet ou mesuré avec un pèse-personne afin de permettre le calcul de l'indice de masse corporelle (IMC), ainsi que pour la conversion de la consommation d'oxygène (ml/kg/min) en valeur usuelle de métabolisme (c.-à.-d. Joule/s, en kcal/min ou en Watt).

Procédure lors de la mesure

A1. Avant le début du travail à étudier :

A1.1. Passer au sujet le questionnaire sur l'aptitude à l'activité physique (Q-AAP) [6];

A1.2. Relever l'âge et la taille (en mètre) du travailleur (poids le cas échéant);

A1.3. Installer le cardiofréquencemètre et le régler pour qu'il enregistre à intervalle de 5 secondes;

Note : L'enregistrement à intervalles de 5 secondes permet d'obtenir un tracé de la fréquence cardiaque suffisamment détaillé pour positionner de façon précise le point de transition durant les pauses de 10 minutes qui permet d'évaluer ΔHR_T.

A1.4. Rappeler les consignes et la démarche du step-test;

A1.5. Administrer le step-test de Meyer et Flenghi (1995) selon le protocole détaillé aux sections 3.3.2 ou 4.3.1.5 ou dans l'article de Meyer et Flenghi (1995);

A1.6. Durant l'exécution du test, il est recommandé de suivre avec le sujet, la cadence de montée-descente en imitant les pas. Ceci permet au sujet de se familiariser plus rapidement avec la cadence surtout aux premiers paliers. La constance de la cadence de 60 pas/min (ou 15 montées/descentes par minute) est critique à la validité du test;

A1.7. Prévoir une pause d'au moins 10 à 15 minutes à la suite du test pour s'assurer que le travailleur ait récupéré suffisamment avant d'entreprendre son travail;

A1.8. Libérer le travailleur.

---

[6] www.csep.ca/cmfiles/publications/parq/**q-aap**.pdf

A2. Durant la journée de travail :

A2.1. Si le travail est exigeant et qu'il est réalisé à la chaleur, le sujet est susceptible de suer beaucoup et donc, il est important de vérifier de temps à autre l'ajustement de la bande émettrice sur la poitrine et le bon fonctionnement du cardiofréquencemètre;

A2.2. Administrer des pauses de 10 minutes après un travail physique important ou à la fin de l'activité d'intérêt;

- Dans toute la mesure du possible, le sujet doit s'asseoir immédiatement après l'arrêt de l'activité;
- La pause est prise en posture assise, au repos le plus strict (sans parler, ni manger, ni boire, ni fumer, etc.);
- Prendre la pause à l'ombre ou à l'abri des sources de rayonnement, dans la mesure du possible. Si la pause est prise à l'extérieur, on peut par exemple utiliser un parasol pour protéger le sujet du rayonnement du soleil;
- Prévoir au moins 4 pauses (milieu d'avant-midi, avant le diner, milieu d'après-midi, à la fin de la journée de travail).

A3. Après le travail :

A3.1. Récupérer le cardiofréquencemètre;

A3.2. Suivre les recommandations du manufacturier du cardiofréquencemètre quant au nettoyage et à la désinfection de l'appareil en vue de la prochaine utilisation.

<u>Préparation des données.</u>

B1. Déterminer la relation HR-$\dot{V}O_2$.

B1.1. Calculer la fréquence cardiaque de repos du palier repos (palier 1) du step-test ($HR_{0_{step}}$).

B1.2. Calculer la fréquence cardiaque moyenne de la dernière minute à chacun des paliers à l'effort (paliers 2 à 5)

B1.3. Calculer la valeur prédite de la $\dot{V}O_2$ selon l'équation ci-dessous (en ml/kg/min). H_m est la hauteur de montée verticale par minute (15×hauteur du palier en mètre, soit 0 pour le palier au repos et 1,725, 3,225, 4,725, 6,225 pour les paliers 2 à 5 respectivement). La $Taille$ du sujet est exprimée en mètre et $palier$ est égal à 1 au repos et 2, 3, 4, 5 pour les 4 hauteurs de marche :

$$\dot{V}O_2 = 7{,}9 + 2{,}46 \times H_m - 2{,}3 \times Taille \cdot palier^{-1}$$

B1.4. Calculer la droite de régression en utilisant les couples de valeurs de fréquence cardiaque moyenne à chaque palier et de $\dot{V}O_2$ prédites, aux 5 paliers (incluant le palier repos);

Note : Chez certains sujets, il est possible de constater une élévation marquée de la fréquence cardiaque durant les premiers paliers, particulièrement le premier palier à l'effort (palier 2 du step-test). Cette élévation peut survenir chez les sujets qui ont de la difficulté à adopter la bonne cadence de montée et de descente. Dans ce cas, il est recommandé de ne pas tenir compte du couple de points correspondant à ce palier pour calculer la relation HR-$\dot{V}O_2$.

B2. Calculer la fréquence cardiaque de repos de la journée de travail HR_0. Pour ce faire, prendre la valeur 1er centile de l'ensemble des valeurs de fréquence cardiaque mesurées durant la journée entière de travail.

B3. Déterminer le profil de ΔHR_T selon la méthode de Vogt et al.

B3.1. Au début du travail, $\Delta HR_T = HR_0$

B3.2. Pour chaque pause de 10 minutes, déterminer ΔHR_T à la fin de la période de travail en calculant la fréquence cardiaque moyenne de la 4e minute après le début de la pause;

∗ Pour plus de précision, le praticien peut déterminer graphiquement ce point de transition marquant le début de la récupération de la composante thermique, sur le profil de récupération de la fréquence cardiaque durant la pause. Le praticien peut se référer à la section 5.3.4.2;

B3.3. La valeur de ΔHR_T à la fin de chaque pause (donc tout juste avant le début de la prochaine période de travail physique) correspond à la fréquence cardiaque à ce moment précis;

B3.4. Tracer une droite entre les valeurs de ΔHR_T déterminées pour obtenir le profil de ΔHR_T au cours de la journée.

B4. Corriger le profil de fréquence cardiaque de travail (les valeurs brutes mesurées) en y soustrayant le profil de ΔHR_T;

B5. Ramener à l'unité temporelle désirée (ex. à intervalles de 1 minute ou selon l'activité);

B6. Estimer la $\dot{V}O_2$ de travail :

B6.1. Pour les valeurs de fréquence cardiaque corrigées inférieures à la fréquence cardiaque de repos au step-test, utiliser la $\dot{V}O_2$ prédite au palier repos du step-test;

B6.2. Pour les autres valeurs de fréquence cardiaque, calculer la $\dot{V}O_2$ correspondante avec la droite HR-$\dot{V}O_2$ obtenue en B1.

B7. Convertir les valeurs de $\dot{V}O_2$ ainsi obtenues en valeur de métabolisme avec les formules de conversion usuelles.

6.2 Limites et recherches futures

La limite principale de la présente thèse tient au nombre limité de métiers étudiés. En effet, les études à la base de cette thèse ont porté essentiellement sur les travailleurs sylvicoles et bien que les principaux métiers de ce secteur aient été étudiés (débroussailleurs, reboiseurs), ils ne couvrent pas le large spectre d'activités physiques retrouvées dans les différentes industries. Il serait donc fort intéressant de poursuivre des collectes de données en reprenant les mêmes mesures afin de vérifier la robustesse de nos résultats quant à leur application à d'autres profils quotidiens de travail physique.

Une autre limite de cette étude tient à la durée de mesure de la $\dot{V}O_2$ relativement courte par rapport à la durée de la journée de travail. Ainsi durant ces courtes périodes, la mesure reflétait principalement un travail d'intensité peu variable dans des conditions d'ambiance qui également étaient peu susceptible de changer beaucoup. Malgré les difficultés que cela suppose, on peut penser qu'une mesure de la $\dot{V}O_2$ durant toute la journée aurait permis de capturer une plus grande variété de conditions de charge physique et d'ambiance thermique qui auraient permis de mieux décrire les états transitoires de ces deux variables. Ainsi, bien que relativement simple, la méthode de Vogt et al. (1970, 1973) ne permet pas de prendre en compte les variations d'intensité dans le travail se produisant durant une période ininterrompue; la méthode prévoit une augmentation constante de ΔHR_T dans le temps. Par exemple, un travailleur pourrait démarrer son travail avec une forte intensité (ex., densité végétale importante à débroussailler), puis réduire graduellement cette intensité dans le temps, et ce, jusqu'à la prochaine pause où il pourra refaire le plein de sa scie. Dans de telles conditions, on peut penser que ΔHR_T augmenterait rapidement en début de période de travail, puis se stabiliserait ou même pourrait décroître dans le temps jusqu'à la pause, soit un profil de ΔHR_T que la méthode de Vogt et al. ne permet pas de décrire dans sa forme actuelle. Il apparaît donc que des recherches visant à mieux préciser le profil de ΔHR_T dans le temps pour des régimes transitoires de travail physique et d'ambiance thermique et ce, sans avoir à recourir à des pauses de 10 minutes soient nécessaires.

Une autre limite de cette étude tient au fait que des mesures obtenues uniquement auprès de sujets masculins ont été utilisées, bien que dans les échantillons d'origine il y avait quelques femmes. Mais, leur nombre trop petit n'aurait pas permis d'en arriver à des résultats robustes. Or, il est reconnu que l'efficacité des mécanismes de thermorégulation varie non seulement d'un individu à

l'autre, mais aussi entre les sexes entre autres en raison de la capacité cardiorespiratoire généralement moindre chez les femmes, d'un ratio de surface corporelle à la masse corporelle plus grand et d'un niveau adipeux sous-cutané plus important (Kaciuba-Uscilko et Grucza, 2001; Parsons, 2014). D'autres facteurs tels que le cycle menstruel et la grossesse viennent également modifier la réponse physiologique aux contraintes thermiques (Kaciuba-Uscilko et Grucza, 2001; Parsons, 2014). Heany, Buono, Pimental et Hodgon (1996), ont rapporté que les modèles d'exposition à la chaleur, normalement établis chez l'homme, ne sont pas applicables chez une population féminine de la *US Navy*. On peut donc s'interroger sur l'application de la méthode de Vogt et al. pour une population féminine, notamment en ce qui a trait à la réactivité cardiaque thermique, vérifiée uniquement chez une population masculine dans la présente thèse ainsi qu'ailleurs (Martinet et Meyer, 1999; J.-P. Meyer *et al.*, 2001). Ainsi, une élévation de 15 ou de 20 bpm devant protéger 95% des salariés n'est peut-être pas adéquate pour des salariées. Il apparaît donc utile de tester ces modèles auprès d'une population féminine.

Selon Vogt et al. (1970, 1973), leur méthode permet d'évaluer l'élévation de la fréquence cardiaque d'origine thermique (ΔHR_T). Toutefois, on peut s'interroger à savoir si l'élévation obtenue par cette méthode ne contient pas d'autres composantes non métaboliques. Il paraît plausible que la majeure partie de la composante soit d'origine thermique, mais est-il possible qu'une petite partie soit associée à d'autres facteurs ? On peut aussi s'interroger à savoir dans quelles conditions ces autres composantes pourraient occuper une plus grande partie de l'élévation de la fréquence cardiaque qu'on attribue à la chaleur.

Les méthodes proposées par Vogt et al. ainsi que par de Kampmann et al. sont des méthodes graphiques, et donc leur application nécessite un temps de mise en œuvre significatif. Par exemple, dans le cas de la présente thèse la détermination du profil de ΔHR_T pour une journée entière de travail à nécessité entre une et deux heures de travail pour les premiers profils tracés. Afin d'accélérer le traitement des données, l'auteur a programmé un logiciel permettant de tracer le profil de ΔHR_T directement sur le graphique de la fréquence cardiaque au cours de la journée au moyen de quelques clics de la souris. Le temps de traitement a été réduit de façon telle qu'une dizaine de profils pouvaient être traités en une heure. Un tel outil pourrait être perfectionné de façon à repérer automatiquement les pauses prises par le sujet et conséquemment les points de transition, puis suggérer au praticien un premier profil pouvant être modifié facilement. Un tel outil informatique rendrait la méthode plus accessible aux praticiens et chercheurs.

CONCLUSION

Cette thèse réexamine certains aspects méthodologiques et pratiques associés à l’estimation du métabolisme de travail à partir de la fréquence cardiaque mesurée durant le travail. Les travaux réalisés visaient à combler certaines lacunes dans la littérature actuelle sur cette approche générale. Les résultats de ces travaux permettent de mieux guider dans son approche méthodologique le praticien ou le chercheur qui désire procéder à une évaluation de la charge de travail physique dans un milieu de travail où une contrainte thermique chaude est présente, que ce soit pour établir un régime d'alternance-travail récupération ou utiliser l'un ou l'autre des différents indices associés au confort et à la contrainte thermique dans une perspective de santé et de sécurité du travail. Les résultats permettent également de mieux connaître la marge d'erreur associée à l'approche générale d'estimation de la charge physique basée sur la fréquence cardiaque en présence d'un niveau de contrainte thermique variable, de même que l'effet de différents aspects méthodologique sur cette marge d'erreur. Les résultats montrent qu'une excellente précision peut être obtenue quant à l'estimation du métabolisme de travail avec cette approche qui demeure relativement simple à mettre en œuvre durant l'étude ainsi qu'au moment de l'analyse des données.

BIBLIOGRAPHIE

ACGIH. (2013). *ACGIH Threshold Limit Values and Biological Exposure Indices*. Cincinnati, OH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists.

Apud, E., Bostrand, L., Mobbs, I. D. et Strehlke, B. (1989). *Guide-lines on ergonomic study in forestry.* Geneva, Switzerland: International Labor Office.

Åstrand, P.-O. et Rodahl, K. (1986). *Textbook of work physiology: physiological bases of exercise*. McGraw Hill.

Bates, G., Parker, R., Ashby, L. et Bentley, T. (2001). Fluid Intake and Hydration Status of Forest Workers – A Preliminary Investigation. *International Journal of Forest Engineering*, *12*(2), 27-32. doi:10.1080/14942119.2001.10702443

Bell, B. A., Morgan, G. B., Schoeneberger, J. A., Kromrey, J. D. et Ferron, J. M. (2014). How low can you go? An investigation of the influence of sample size and model complexity on point and interval estimates in two-level linear models. *Methodology: European Journal of Research Methods for the Behavioral and Social Sciences*, *10*(1), 1-11. doi:10.1027/1614-2241/a000062

Beltrami, F. G., Froyd, C., Mamen, A. et Noakes, T. D. (2014). The validity of the Moxus Modular metabolic system during incremental exercise tests: impacts on detection of small changes in oxygen consumption. *European Journal of Applied Physiology*, *114*(5), 941-950. doi:10.1007/s00421-014-2825-x

Bland, J. M. et Altman, D. G. (1986). Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *The lancet*, *327*(8476), 307–310.

Bland, J. M. et Altman, D. G. (1995). Comparing methods of measurement: why plotting difference against standard method is misleading. *The Lancet*, *346*(8982), 1085–1087.

Bland, J. M. et Altman, D. G. (1999). Measuring agreement in method comparison studies. *Statistical methods in medical research*, *8*(2), 135–160.

Bot, S. D. M. et Hollander, A. P. (2000). The relationship between heart rate and oxygen uptake during non-steady state exercise. *Ergonomics*, *43*(10), 1578-1592. doi:10.1080/001401300750004005

Bouchard, D. R. et Trudeau, F. (2008). Estimation of energy expenditure in a work environment: Comparison of accelerometry and oxygen consumption/heart rate regression. *Ergonomics*, *51*(5), 663-670. doi:10.1080/00140130701780484

Brake, D. J. et Bates, G. P. (2002). Limiting metabolic rate (thermal work limit) as an index of thermal stress. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, *17*(3), 176-186. doi:10.1080/104732202753438261

Brouha, L. (1967). *Physiology in Industry*. Pergamon Press.

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

Buckley, J. P., Sim, J., Eston, R. G., Hession, R. et Fox, R. (2004). Reliability and validity of measures taken during the Chester step test to predict aerobic power and to prescribe aerobic exercise. *British Journal of Sports Medicine*, *38*(2), 197-205. doi:10.1136/bjsm.2003.005389

Campbell, J. P. et Campbell, R. J. (1988). *Productivity in Organizations: New Perspectives from Industrial and Organizational Psychology*. Wiley.

Chengalur, S., Rodgers, S. et Bernard, T. (2004). *Kodak's ergonomic design for people at work*. New York: John Wiley and Sons.

Coyle, E. F. (1998). Cardiovascular drift during prolonged exercise and the effects of dehydration. *International Journal of Sports Medicine*, *19 Suppl 2*, S121-124. doi:10.1055/s-2007-971975

Coyle, E. F. et González-Alonso, J. (2001). Cardiovascular drift during prolonged exercise: new perspectives. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, *29*(2), 88-92.

Critchley, L. A. et Critchley, J. A. (1999). A meta-analysis of studies using bias and precision statistics to compare cardiac output measurement techniques. *Journal of Clinical Monitoring and Computing*, *15*(2), 85-91.

Dewitte, K., Fierens, C., Stöckl, D. et Thienpont, L. M. (2002). Application of the Bland–Altman Plot for Interpretation of Method-Comparison Studies: A Critical Investigation of Its Practice. *Clinical Chemistry*, *48*(5), 799-801.

Dubeau, D., Imbeau, D., LeBel, L. et Dubé, P.-A. (2010). *Performance organisationnelle et productivité des reboiseurs lors de la mise en terre de plants forestiers.* (Rapport interne) (p. 49). Ministère des Ressources naturelles et de la Faune - Direction de la recherche forestière. Québec, Gouvernement du Québec.

Dubé, P.-A., Imbeau, D., Dubeau, D., LeBel, L. et Kolus, A. (2014). Removing the thermal component from Heart Rate provides an accurate VO2 estimation in forest work. *Manuscript submitted for publication*.

Duffield, R., Dawson, B., Pinnington, H. C. et Wong, P. (2004). Accuracy and reliability of a Cosmed K4b2 portable gas analysis system. *Journal of Science and Medicine in Sport*, *7*(1), 11-22. doi:10.1016/S1440-2440(04)80039-2

Gellish, R. L., Goslin, B. R., Olson, R. E., McDonald, A., Russi, G. D. et Moudgil, V. K. (2007). Longitudinal modeling of the relationship between age and maximal heart rate. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *39*(5), 822-829. doi:10.1097/mss.0b013e31803349c6

Heany, U. J., Buono, M. J., Pimental, N. A. et Hodgon, J. A. (1996). The effects of exercise and gender on heat tolerance time during prolonged heat exposure. Dans Y. Shapiro, D. S. Morgan et Y. Epstein (dir.), *Environmental ergonomics - recent progress and new frontiers* (pp. 93-96). London and Tel Aviv: Freund Publishing House.

Imbeau, D., Desjardins, L., Dessureault, P. C., Riel, P. et Fraser, R. (1995). Oxygen consumption during scaffold assembling and disassembling work: Comparison between field measurements and estimation from heart rate. *International Journal of Industrial Ergonomics*, *15*(4), 247-259. doi:10.1016/0169-8141(94)00040-A

Imbeau, D., Dubé, P.-A., Dubeau, D. et Lebel, L. (2010). Les effets d'un entraînement physique pré-saison sur le travail et la sécurité des débroussailleurs - Étude de faisabilité d'une approche de mesure. *IRSST*, *Étude et recherches*(Rapport R-664), 75 pp.

Imbeau, D., Dubé, P.-A. et Wadell, O. (2009). *Validation du step-test de Meyer et Flenghi (1995) à l'aide d'un test maximal sur tapis roulant*. Montréal, Qué.: Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail. Repéré à http://site.ebrary.com/id/10330370

International Organization for Standardization. (1989). ISO 7243: Hot environments–Estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT-index (wet bulb globe temperature). Geneva, Switzerland: ISO.

International Organization for Standardization. (2006). ISO 7730: Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal confort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. Geneva, Switzerland: ISO.

International Organization for Standardization. (2004). ISO 7933: Ergonomics of the thermal environment–Analytical determination and interpretation of heat stress using calculation of the predicted heat strain, . Geneva, Switzerland: ISO.

International Organization for Standardization. (2004). ISO 8996: Ergonomics of the thermal environment–Determination of metabolic rate. Geneva, Switzerland: ISO.

International Organization for Standardization. (2007). ISO 9220: Estimation of thermal insulation and water vapour resistance of a clothing ensemble. Geneva, Switzerland: ISO.

International Organization for Standardization. (2004). ISO 9886: Evaluation of thermal strain by physiological measurements. Geneva, Switzerland: ISO.

International Organization for Standardization. (2008). ISO 11079: Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of cold stress when using required clothing insulation (IREQ) and local cooling effects. Geneva, Switzerland: ISO.

Kaciuba-Uscilko, H. et Grucza, R. (2001). Gender differences in thermoregulation. *Current Opinion in Clinical Nutrition and Metabolic Care*, *4*(6), 533-536.

Kamon, E. et Ryan, C. (1981). Effective heat strain index using pocket computer. *American Industrial Hygiene Association Journal*, *42*(8), 611-615. doi:10.1080/15298668191420369

Kampmann, B., Kalkowsky, B. et Piekarski, C. (2001). Estimation of metabolic rate from cardiac frequency for field studies: correcting for « thermal pulses ». *Journal of Thermal Biology*, *26*(4–5), 437-440. doi:10.1016/S0306-4565(01)00057-2

Lamarra, N., Whipp, B. J., Ward, S. A. et Wasserman, K. (1987). Effect of interbreath fluctuations on characterizing exercise gas exchange kinetics. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)*, *62*(5), 2003-2012.

Langlois, Julie. (2004). Intégration des facteurs humains dans l'étude du travail de débroussailleur : Dégagement de la régénération naturelle et artificielle. Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval pour l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.), Janvier 2004, 152 pages.

Léger, L. et Boucher, R. (1980). An indirect continuous running multistage field test: the Université de Montréal track test. *Canadian Journal of Applied Sport Sciences. Journal Canadien Des Sciences Appliquées Au Sport*, *5*(2), 77-84.

Leonard, W. R. (2003). Measuring human energy expenditure: what have we learned from the flex-heart rate method? *American Journal of Human Biology: The Official Journal of the Human Biology Council*, *15*(4), 479-489. doi:10.1002/ajhb.10187

Londeree, B. R. et Moeschberger, M. L. (1982). Effect of Age and Other Factors on Maximal Heart Rate. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, *53*(4), 297-304. doi:10.1080/02701367.1982.10605252

Louhevaara, V. et Kilbom, A. (2005). Dynamic work assessment. Dans *Evaluation of Human Work, 3rd Edition*. CRC Press.

Mairiaux, P. et Malchaire, J. (1990). *Le travail en ambiance chaude: principes, méthodes, mise en oeuvre*. Paris: Masson.

Martinet, C. et Meyer, J. P. (1999). Travail à la chaleur et confort thermique. *Les notes scientifiques et techniques de l'INRS*, *184*. Repéré à http://lara.inist.fr/handle/2332/1616

McArdle, W. D., Katch, F. I. et Katch, V. L. (2006). *Essentials of Exercise Physiology*. Lippincott Williams & Wilkins.

McCrory, M. A., Molé, P. A., Nommsen-Rivers, L. A. et Dewey, K. G. (1997). Between-day and within-day variability in the relation between heart rate and oxygen consumption: effect

on the estimation of energy expenditure by heart-rate monitoring. *The American Journal of Clinical Nutrition*, *66*(1), 18-25.

McLaughlin, J. E., King, G. A., Howley, E. T., Bassett, Jr, D. R. et Ainsworth, B. E. (2001). Validation of the COSMED K4 b2 Portable Metabolic System. *International Journal of Sports Medicine*, *22*(4), 280-284. doi:10.1055/s-2001-13816

Mc Naughton, L. R. et Sherman, R. (2005). Portable gas analyser Cosmed K4b2 compared to a laboratory based mass spectrometer system. *The Journal of sports medicine and physical fitness*, *45*(3), 315-23.

Meyer, J. P. et Flenghi, D. (1995). Détermination de la dépense énergétique de travail et des capacités cardiorespiratoires maximales à l'aide d'un exercice sous maximal sur step test. *DMT*, *64*, 245–251.

Meyer, J.-P., Martinet, C., Payot, L., Didry, G. et Horwat, F. (2001). Évaluation de l'astreinte thermique à l'aide de la fréquence cardiaque. *Le travail humain*, *Vol. 64*(1), 29-44. doi:10.3917/th.641.0029

Mital, A. et Shell, R. L. (1986). Determination of rest allowances for repetitive physical activities that continue for extended hours. Dans *Work Measurement - Principles and Practices* (Institute of Industrial Engineers, pp. 133-141). Norcross, Georgia.

Nevill, A. M. et Atkinson, G. (1997). Assessing agreement between measurements recorded on a ratio scale in sports medicine and sports science. *British Journal of Sports Medicine*, *31*(4), 314-318. doi:10.1136/bjsm.31.4.314

Nielsen, R. et Meyer, J.-P. (1987). Evaluation of metabolism from heart rate in industrial work. *Ergonomics*, *30*(3), 563-572. doi:10.1080/00140138708969745

Nieman, D. C., Austin, M. D., Benezra, L., Pearce, S., McInnis, T., Unick, J. et Gross, S. J. (2006). Validation of Cosmed's FitMate™ in Measuring Oxygen Consumption and Estimating Resting Metabolic Rate. *Research in Sports Medicine*, *14*(2), 89-96. doi:10.1080/15438620600651512

Nieman, D. C., LaSasso, H., Austin, M. D., Pearce, S., McInnis, T. et Unick, J. (2007). Validation of Cosmed's FitMate™ in Measuring Exercise Metabolism∗. *Research in Sports Medicine*, *15*(1), 67-75. doi:10.1080/15438620601184380

Parsons, K. (2014). *Human Thermal Environments: The Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort, and Performance, Third Edition*. CRC Press.

Paul, M. A., Ducharme, M. S., Mandzak, T. G., Limmer, R. E. et Frim, J. (1999). *An Overnight Comparison of Core Temperature Using a Rectal Probe and a Radio Pill.*

Robergs, R. A., Dwyer, D. et Astorino, T. (2010). Recommendations for Improved Data Processing from Expired Gas Analysis Indirect Calorimetry. *Sports Medicine*, *40*(2), 95-111. doi:10.2165/11319670-000000000-00000

Robergs, R. A. et Landwehr, R. (2002). The surprising history of the « HRmax= 220-age » equation. *J Exerc Physiol*, *5*(2), 1–10.

Rodahl, K. (2003). *Physiology Of Work*. CRC Press.

Rohmert, W. (1973). Problems of determination of rest allowances Part 2: Determining rest allowances in different human tasks. *Applied Ergonomics*, *4*(3), 158-162. doi:10.1016/0003-6870(73)90166-X

Rowell, L. B. (1986). *Human circulation: regulation during physical stress*. Oxford University Press.

Shephard, R. J. (1978). *Human Physiological Work Capacity*. Cambridge University Press.

Spurr, G. B., Prentice, A. M., Murgatroyd, P. R., Goldberg, G. R., Reina, J. C. et Christman, N. T. (1988). Energy expenditure from minute-by-minute heart-rate recording: comparison with indirect calorimetry. *The American Journal of Clinical Nutrition*, *48*(3), 552-559.

Sykes, K. (1998). Chester step test; resource pack (Version 3). Cheshire, UK: Chester College of Higher Education.

Thomas, S., Reading, J. et Shephard, R. (1992). Revision of the Physical Activity Readiness Questionnaire ({PAR-Q}). *Canadian journal of sport sciences*, *17*(4), 338-345.

Toupin, D., LeBel, L., Dubeau, D., Imbeau, D. et Bouthillier, L. (2007). Measuring the productivity and physical workload of brushcutters within the context of a production-based pay system. *Forest Policy and Economics*, *9*(8), 1046-1055. doi:10.1016/j.forpol.2006.10.001

Trites, D. G., Robinson, D. G. et Banister, E. W. (1993). Cardiovascular and muscular strain during a tree planting season among British Columbia silviculture workers. *Ergonomics*, *36*(8), 935-949. doi:10.1080/00140139308967958

Vogt, J. J., Foehr, R., Kirsch, F., Golle, F. et Meyer-Schwertz, M. T. (1970). Estimation des charges de travail et des charges de chaleur en situation réelle de travail : principes et applications d'une nouvelle méthodologie. *Le Travail Humain*, *33*(1/2), 125-139.

Vogt, J.-J. et Metz, B. (1981). Ambiances thermiques. Dans J. Scherrer (dir.), *Précis de physiologie du travail, notions d'ergonomie* (pp. 217-263). Paris : Masson.

Vogt, J. J., Meyer-Schwertz, M. T., Metz, B. et Foehr, R. (1973). Motor, thermal and sensory factors in heart rate variation: a methodology for indirect estimation of intermittent muscular work and environmental heat loads. *Ergonomics*, *16*(1), 45-60. doi:10.1080/00140137308924481

Wingo, J. E., Ganio, M. S. et Cureton, K. J. (2012). Cardiovascular drift during heat stress: implications for exercise prescription. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, *40*(2), 88-94. doi:10.1097/JES.0b013e31824c43af

ANNEXE A – EXEMPLE DU QUESTIONNAIRE POUR L'UTILISATION DE LA CAPSULE THERMIQUE

Questionnaire pour l'utilisation des capsules thermiques

Lisez attentivement et répondez honnêtement à chacune des questions suivantes. Cochez OUI ou NON.

Les capsules thermiques ne peuvent être utilisées par des personnes ayant des difficultés de déglutition (difficulté d'avaler de la nourriture ou de grosses capsules) ou des difficultés d'évacuation.		
Oui ❒	Non ❒	Éprouvez-vous de la difficulté à avaler de la nourriture ou de grosses capsules ou comprimés?
L'utilisation des capsules est contre indiquée pour les personnes souffrant de maladie obstructive des voies gastro-intestinales telles que:		
Oui ❒	Non ❒	Maladie de Crohn
Oui ❒	Non ❒	Sténose de l'œsophage (rétrécissement de l'œsophage)
Oui ❒	Non ❒	Recto-colite hémorragique (colite ulcéreuse)
Oui ❒	Non ❒	Ulcère gastroduodénal ou ulcère de l'estomac
Oui ❒	Non ❒	Diverticulose
Oui ❒	Non ❒	Affection abdominale inflammatoire
Oui ❒	Non ❒	Autres maladies obstructive des voies gastro-intestinales
Oui ❒	Non ❒	Avez-vous subi récemment des chirurgies gastro-intestinales (œsophage, estomac, intestin, colon, rectum, anus)?
Oui ❒	Non ❒	Connaissez-vous une autre raison pour laquelle vous ne devriez pas utiliser la capsule thermique?

Si vous avez répondez OUI à l'une ou l'autre des questions ci-dessus, vous ne pouvez pas utiliser la capsule thermique.

Si vous avez répondu **NON** à toutes les questions, vous pouvez utiliser la capsule thermique. Le risque potentiel sur la santé tient à la difficulté temporaire d'ingérer la pilule par certaines personnes tout comme pour avaler une pilule de vitamines.

Signature du participant: _____ Date:_____

Signature du témoin: _____ Date:_____

Dernière modification le 25 mars 2008 Page 1 de 1