

## 23. Énergie Métabolique

### 23.4 – Application - Transports

François Péronnet

Daniel R. Rousse, ing., Ph.D.

*Département de génie mécanique*

Bastien Thomasset, M.Sc.A.

Antoine Brégaint, M.Sc.A.

Coralie Banon, M.Ing.

# Introduction et objectifs de la capsule

- L'objectif de cette présentation est de présenter quelques applications portant sur les concepts étudiés dans les trois premières présentations.
- Les exemples d'applications possibles sont nombreux et variés et cette présentation s'intéresse spécifiquement au sport et aux transports.
- Avec ces applications, les étudiants pourront appréhender les différentes définitions et concepts étudiés dans le but de déterminer différents paramètres énergétiques pour une application donnée.

# Transport

- L'étude suivante montre, en fonction de la vitesse de marche, le coût énergétique du transport d'une charge placée dans le sac à dos exprimée en % de la masse du sujet : 0, 22, 44 et 66 % de la masse corporelle. Les caractéristiques des sujets sont aussi indiquées (masse de 73kg en moyenne).

Applied Ergonomics 94 (2021) 103395



ELSEVIER

Contents lists available at [ScienceDirect](#)

Applied Ergonomics

journal homepage: <http://www.elsevier.com/locate/apergo>



Effects of modern military backpack loads on walking speed and cardiometabolic responses of US Army Soldiers

David P. Looney<sup>a</sup>, Elizabeth M. Doughty<sup>a,b</sup>, Peter S. Figueiredo<sup>a,b</sup>, Sai V. Vangala<sup>a,b</sup>, J. Luke Pryor<sup>c</sup>, William R. Santee<sup>a,b</sup>, Holly L. McClung<sup>a</sup>, Adam W. Potter<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> US Army Research Institute of Environmental Medicine (USARIEM), 10 General Greene Avenue, Natick, MA, 01760, USA

<sup>b</sup> Oak Ridge Institute for Science and Education (ORISE), 1299 Bethel Valley Rd, Oak Ridge, TN, 37830, USA

<sup>c</sup> Center for Research and Education in Special Environments, Department of Exercise and Nutrition Sciences, University at Buffalo, NY, 14214, USA

## 2.2. Participants

Fifteen US Army soldiers (1 woman, 14 men; age,  $22 \pm 2$  years; height,  $173 \pm 7$  cm; BM,  $73 \pm 10$  kg;  $VO_{2max}$ ,  $50.8 \pm 3.8$  ml  $kg^{-1} \cdot min^{-1}$ ;  $HR_{max}$ ,  $195 \pm 7$  bpm) participated in this study. Participants were briefed on the purpose of the study and potential risks before voluntarily giving their informed written consent. This study was approved by the Institutional Review Board (IRB) at the US Army Research Institute of Environmental Medicine (USARIEM; Natick, MA). Investigators adhered to Department of Defense Instruction 3216.02 and 32 CFR 219 on the use of volunteers in research.

# Transport

- L'augmentation de la vitesse de déplacement est représentée par l'escalier en gris dont les marches augmentent de 1,16 m/sec à 1,97 m/sec, par palier de 0,09 m/sec. Le coût énergétique du transport de la charge est exprimé en  $VO_2$  relatif ( $VO_{2\text{spéc}} / VO_{2\text{max}} \text{ spécifique} \times 100$ , les  $VO_2$  spéc étant en mL O<sub>2</sub>/kg/min en mL/kg/min).

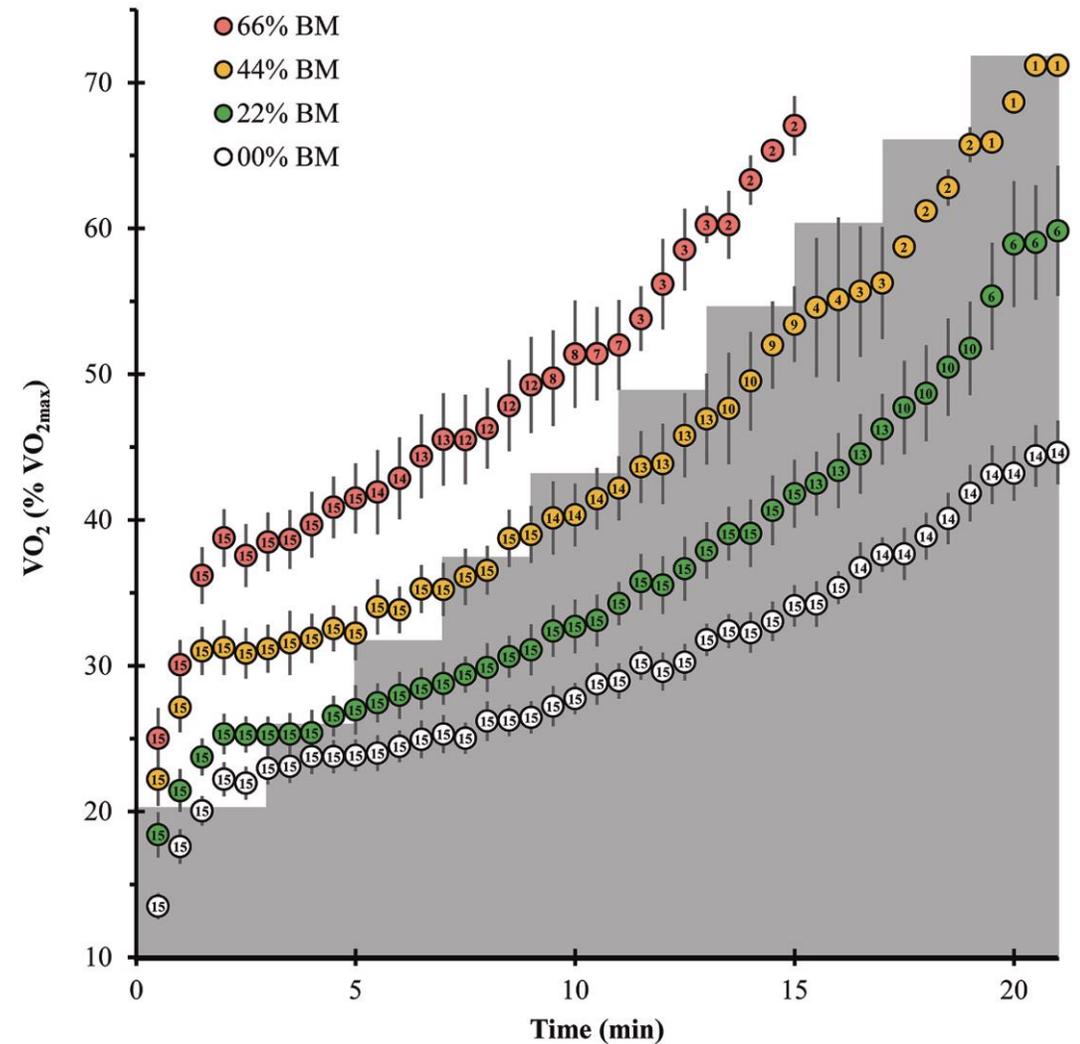


Fig. 3. Oxygen uptake ( $VO_2$ ) over time during incremental treadmill walking with four levels of backpack load. % BM, percentage of body mass; %  $VO_{2\text{max}}$ , percentage of maximal oxygen uptake; Gray fill, treadmill speed at each time point ranging from 1.16 to 1.97  $\text{m s}^{-1}$  by 0.09  $\text{m s}^{-1}$  increments; Marker labels, number of study participants.

# Transport

1) Sachant que le VO<sub>2</sub>max spécifique des sujets est de 50,8 mL/kg/min, en digitalisant les données du graphique ci-dessus, on obtient le tableau suivant qui indique le VO<sub>2</sub> spec soutenu en mL/kg/min en fonction de la vitesse et de la charge.

Vitesse de marche		Charge placée dans le sac à dos en % de la masse du sujet				
		Bunc & Dlouha	Looney et al. Applied Ergonomics 2021			
m/sec	km/h	VO <sub>2</sub> spécifique (mL O <sub>2</sub> / kg / min)				
		0%	0%	22%	44%	66%
1,16	4,18		11,62	12,88	15,98	19,61
1,25	4,50		12,09	13,82	16,35	21,03
1,34	4,82		12,87	14,76	17,81	23,02
1,43	5,15		13,44	15,76	19,65	24,85
1,52	5,47		14,75	17,33	21,43	26,37
1,61	5,80		16,11	19,26	23,84	30,62
1,7	6,12		17,31	21,2	26,99	33,98
1,79	6,44		19,09	23,51	28,51	
1,88	6,77		21,29	26,18	33,28	
1,97	7,09		22,60	30,39	36,01	

Dans la colonne vide (en jaune) calculer le VO<sub>2</sub> spec estimé par l'équation de Bunc et Dlouha pour une charge nulle en fonction de la vitesse de déplacement. Comparer avec la valeur observée dans l'étude de Looney et al. dans les mêmes conditions. Qu'en conclure quant à la validité de la calorimétrie indirecte respiratoire pour évaluer le coût énergétique ?

# Transport

- Equations de Bunc et Dlouha (J Sports Med Phys Fitness 1997)  $v \in [3; 12]km/h$  :

$$VO_{2spécifique} [mL/kg/min] = 4.501 - 0.108 * v + 0.379 * v^2$$

Vitesse de marche		Charge placée dans le sac à dos en % de la masse du sujet				
		Bunc & Dlouha	Looney et al. Applied Ergonomics 2021			
m/sec	km/h	VO2 spécifique (mL O2 / kg / min)				
		0%	0%	22%	44%	66%
1,16	4,18	10,66	11,62	12,88	15,98	19,61
1,25	4,50	11,69	12,09	13,82	16,35	21,03
1,34	4,82	12,80	12,87	14,76	17,81	23,02
1,43	5,15	13,99	13,44	15,76	19,65	24,85
1,52	5,47	15,26	14,75	17,33	21,43	26,37
1,61	5,80	16,61	16,11	19,26	23,84	30,62
1,7	6,12	18,04	17,31	21,2	26,99	33,98
1,79	6,44	19,54	19,09	23,51	28,51	
1,88	6,77	21,13	21,29	26,18	33,28	
1,97	7,09	22,80	22,60	30,39	36,01	

- Les écarts entre les résultats de l'étude et avec l'équation de Bunc et Dlouha sont faibles ce qui démontre la validité de la calorimétrie indirecte respiratoire pour évaluer le coût énergétique.

# Transport

2) Déterminer maintenant le coût du déplacement de la marche avec une charge placée dans un sac à dos, en kcal/kg de masse corporelle/km selon les données du tableau précédent. Commenter.

Vitesse de marche		Charge placée en % de la masse corporelle				
		Bunc & Dlouha	Looney et al. Applied Ergonomics 2022			
m/sec	km/h	VO2 spécifique (kcal/kg/km)				
		0%	0%	22%	44%	66%
1,16	4,18					
1,25	4,50					
1,34	4,82					
1,43	5,15					
1,52	5,47					
1,61	5,80					
1,7	6,12					
1,79	6,44					
1,88	6,77					
1,97	7,09					

# Transport

- $$Coût_{depl} \left[ \frac{kcal}{kg.km} \right] = VO_{2\text{ spécifique } depl} \left[ \frac{ml}{kg.min} \right] * \frac{5}{1000} \left[ \frac{kcal}{mL} \right] * v_{depl} \left[ \frac{min}{km} \right]$$

		Charge placée en % de la masse corporelle				
		Bunc & Dlouha	Looney et al. Applied Ergonomics 2022			
Vitesse de marche		VO2 spécifique (kcal/kg)				
m/sec	km/h	0%	0%	22%	44%	66%
1,16	4,18	0,77	0,83	0,93	1,15	1,41
1,25	4,50	0,78	0,81	0,92	1,09	1,40
1,34	4,82	0,80	0,80	0,92	1,11	1,43
1,43	5,15	0,82	0,78	0,92	1,15	1,45
1,52	5,47	0,84	0,81	0,95	1,17	1,45
1,61	5,80	0,86	0,83	1,00	1,23	1,58
1,7	6,12	0,88	0,85	1,04	1,32	1,67
1,79	6,44	0,91	0,89	1,09	1,33	
1,88	6,77	0,94	0,94	1,16	1,48	
1,97	7,09	0,96	0,96	1,29	1,52	

# Transport

- Ces calculs montrent qu'il est très coûteux de déplacer des charges lourdes sur de longues distances (ou pendant longtemps, ce qui revient au même). Notre espèce n'a pas été sélectionnée pour être un animal de bât (aucune espèce d'ailleurs).
- Pour transporter de lourdes charges sur de longues distances notre espèce a imaginé des engins qui réduisent son effort (augmentent son efficacité) en la libérant du port de la charge :
  - traction sur rondins ou sur traîneau (sur le sol ou la neige)
  - utilisation de la roue (brouette, chariot, bicyclette)
  - utilisation de l'eau (flottage, radeau, bateau avec l'aide éventuelle du courant).

# Transport

- Un exemple de l'utilisation de l'eau pour porter de lourdes charges est donné par l'article suivant : la gondole vénitienne. Elle est utilisée comme exemple de barques, canots, pirogues, bacs, barges, etc. pour le transport de marchandises ou de personnes sur de courtes ou de longues distances, sur des rivières, des lacs ou en navigation côtière en mer.

Eur J Appl Physiol (1990) 60:175-178

European  
Journal of **Applied  
Physiology**  
and Occupational Physiology  
© Springer-Verlag 1990

2

## Energy cost and efficiency of sculling a Venetian gondola

C. Capelli<sup>1</sup>, C. Donatelli, C. Moia<sup>2</sup>, C. Valier, G. Rosa<sup>3</sup>, and P. E. di Prampero<sup>1</sup>

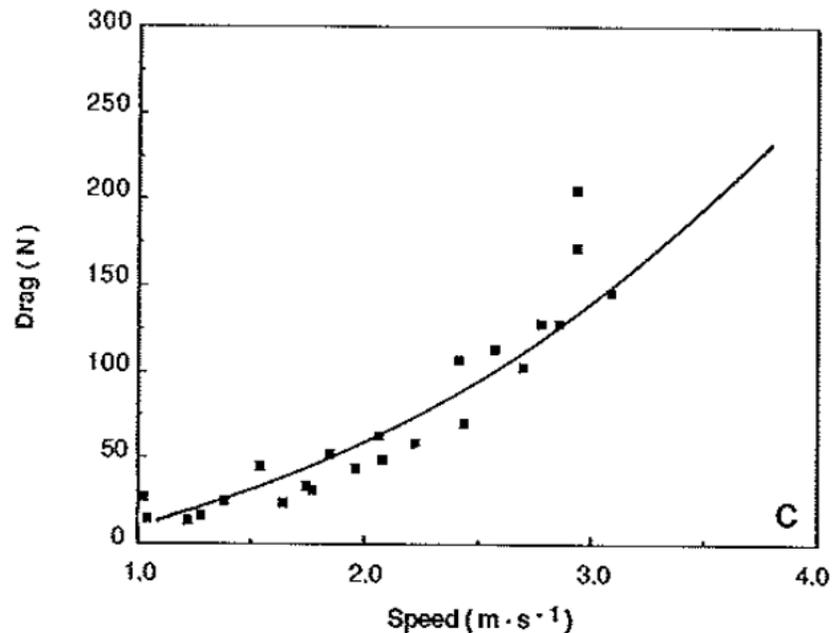
<sup>1</sup> Istituto di Biologia, Facoltà di Medicina e Chirurgia, Via Gervasutta, 48, I-33100, Udine, Italy

<sup>2</sup> Department of Physiology, Centre Médical Universitaire, 1, rue Michel Servet, CH-1211 Geneva 4, Switzerland

<sup>3</sup> Marathon Sports Medical Center, Via Creta 56/D, I-25125, Brescia, Italy

# Transport

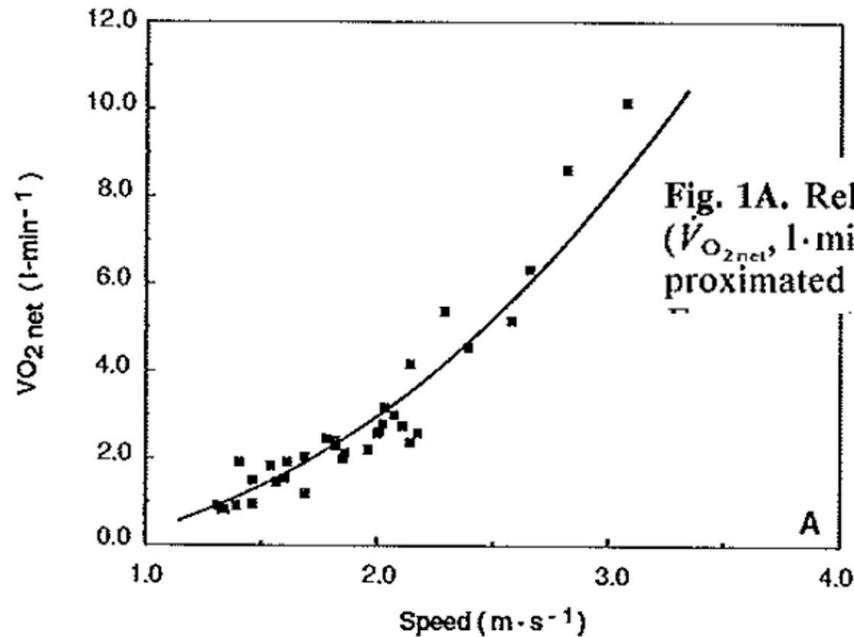
- L'intérêt de ce type d'engin est l'utilisation du principe d'Archimède pour porter la charge, pour la faible résistance de l'eau à l'avancement (autant que la vitesse reste basse), et pour la possibilité d'utiliser la puissance métabolique de plusieurs sujets, embarqués ou tirant l'embarcation de la terre (halage), et dans le cas du hallage de remplacer les hommes par des animaux de traits (on peut utiliser
- Dans le cas de la gondole les auteurs ont d'abord mesuré la traînée ou force de résistance à l'avancement (drag, en N), en fonction de la vitesse, en la tirant avec un bateau à moteur et en mesurant la force exercée sur la corde :



- On peut voir que la traînée augmente de façon curvilinéaire jusqu'à une vitesse d'environ 3 m/sec où elle paraît augmenter de façon « verticale ». Cette vitesse est sans doute proche de la vitesse critique de cette coque faite pour le transport de pondéreux mais non pour la course.

# Transport

- Ils ont ensuite mesuré la consommation d'oxygène du ou des rameurs (1 à 4) en fonction de la vitesse de déplacement :



# Transport

3) 4 rameurs, dont la masse individuelle est de 72,8 kg, sont présents sur une gondole de 450 kg. En utilisant la relation entre le  $VO_2$ , en L/min, et la vitesse, en m/sec, calculer dans le tableau suivant le coût énergétique du déplacement en fonction de la vitesse, en L  $O_2$ /min et en ml/kg/min. Calculer aussi le  $VO_2$  spéc à la marche selon l'équation de Bunc et Blouha aux vitesses les plus basses : 1.25 et 1.5 m/sec

4) Calculer ensuite le  $VO_2$  nécessaire, en L/min, pour faire avancer la gondole à 12 km/h

5) Sachant que le  $VO_{2max}$  moyen d'un sujet ( 4 au total) est de 3 L/min (donc 12 L/min au total), quelle est la puissance relative soutenue, en % $VO_{2max}$ , pour avancer à cette vitesse à quatre rameurs?

Vitesse		VO2 absolu	VO2 spéc	Bunc Blouha
m/sec	km/h	L $O_2$ /min	mL/kg/min	mL/kg/min
1,25	4,5			
1,5	5,4			
1,75	6,3			
2	7,2			
2,25	8,1			
2,5	9,0			
2,75	9,9			
3	10,8			
3,25	11,7			

# Transport

- $VO_{2absolu} [L/min] = 0,44 * v^{2,67}$
- $VO_{2specifique} [mL/kg/min] = VO_{2absolu} [L/min] * \frac{1000}{masse_{corporelle_{totale}} [kg]}$   
avec  $masse_{corporelle_{totale}} = 4 * 72,8 = 291,2 \text{ kg}$
- $VO_{2specifique} [mL/kg/min] = 4.501 - 0.108 * v + 0.379 * v^2$

Vitesse		VO2 absolu	VO2 spéc	Bunc Dlouha
m/sec	km/h	L O2/min	mL/kg/min	mL/kg/min
1,25	4,5	0,798	2,74	11,69
1,5	5,4	1,299	4,46	14,97
1,75	6,3	1,960	6,73	
2	7,2	2,800	9,62	
2,25	8,1	3,835	13,17	
2,5	9,0	5,081	17,45	
2,75	9,9	6,553	22,51	
3	10,8	8,267	28,39	
3,25	11,7	10,237	35,16	

- Vous pouvez constater que pour une puissance équivalente à celle de la marche à environ 5 km/h un individu peut déplacer, à la même vitesse, une gondole de 450 kg transportant 4 sujets pesant en tout environ 300 kg (291,2 pour être exacte), soit une masse totale de 750 kg.

# Transport

- Pour faire avancer la gondole à 12 km/h (3,33 m/s), le VO<sub>2</sub> nécessaire, en L/min est :

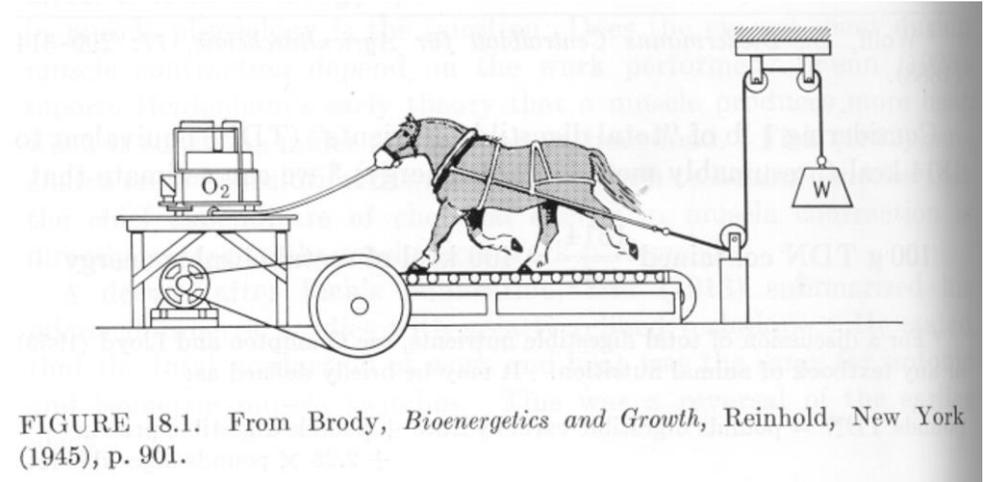
$$VO_{2_{absolu}} = 0,44 * v^{2,67} = 10,953 \text{ L/min}$$

- En considérant que le VO<sub>2</sub>max moyen des quatre participants est de 3 L/min, la puissance relative à soutenir est :

$$P_{aérobie_{relative}} = \frac{VO_{2_{absolu}} [\text{L/min}]}{VO_{2_{max}} [\text{L/min}]} * 100 = \frac{10,953}{3 * 4} * 100 = 91 \% VO_{2_{max}}$$

# Transport

- Une autre façon de faciliter les transports est d'utiliser des animaux de bât ou trait : chevaux, mulets, ânes, bœufs, chameau, dromadaire, lama. Le plus utilisé dans toutes les cultures a été et est encore le cheval qui est un animal de bât, peut être monté, et peut tirer des chariots ou des charrues (et plus tard d'autres machines agricoles mécanique : faucheuse, râteau à foin).
- **Les études de calorimétrie indirecte respiratoire montrent que, chez le Cheval (comme chez tous les animaux qui ont été étudiés), le rendement mécanique est semblable à celui observé dans notre espèce (environ 25%). La puissance mécanique qu'il peut fournir est donc supérieure à celle de notre espèce (et de la plupart des espèces domestiquées) car son  $VO_2\text{max}$  est beaucoup plus grand, sa masse beaucoup plus importante, et car 55% de sa masse en moyenne est constituée de muscle (Contre 35 à 45% dans notre espèce).**



# Transport

6) Le  $VO_2\text{max}$  d'un cheval « moyen » (c'est-à-dire qui n'a pas été sélectionné pour la course hippique) est d'environ  $150 \text{ mL/kg/min}$ , soit environ trois fois celle d'un sujet adulte masculin « moyen ». Sachant que la masse d'un cheval de trait est d'environ  $500 \text{ kg}$  et qu'il a développé ici une puissance mécanique de  $6400 \text{ W}$ , déterminer les valeurs suivantes :

- Son  $VO_2\text{max}$  (en  $\text{L/min}$ )
- Sa puissance aérobie maximale (en  $\text{W}$ , et en  $\text{HP}$ )
- Son rendement mécanique brut (en %)

# Transport

- $VO_{2max} = VO_{2max} [\text{mL/kg/min}] * \frac{1}{1000} * masse_{cheval} [\text{kg}] = \mathbf{75 \text{ L/min}}$
- $P_{aérobie_{max}} = VO_{2max} \left[ \frac{\text{L}}{\text{min}} \right] * Eq_{enrO_2} \left[ \frac{\text{kcal}}{\text{L}} \right] * \frac{1}{60} * C_{p_{eau}} \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg.K}} \right] = \mathbf{26250 \text{ W}}$
- $P_{aérobie_{max}} [\text{HP}] = P_{aérobie_{max}} * 0,0013596216173039 = \mathbf{35,69 \text{ HP}}$
- $Rendement_{mec} = \frac{P_{mec}}{P_{aérobie_{max}}} * 100 = \frac{6400}{26250} * 100 = \mathbf{24,4 \%}$

# Transport

Sur un chemin de halage, ce cheval tire un train de gondoles semblables à celles de l'application précédente (750 kg au total, 300 kg pour l'ensemble de la masse corporelle à transporter et 450 kg pour la gondole) à une vitesse de 9,5 km/h. Le cheval transporte ainsi la charge utile pendant une heure. On suppose que :

- la relation de consommation d'oxygène du ou des rameurs en fonction de la vitesse de déplacement est également valable pour le cheval;
- le rendement est similaire entre les deux espèces.

7) Combien de gondoles comprend ce train sachant qu'il travaille à une puissance aérobie relative de 47 % $VO_2$ max ?

8) Combien faudrait-il de sujets semblables à ceux de l'étude ci-dessus sur le sac à dos militaire pour transporter la même charge utile sur la même distance en portant des charges de 44% de leur masse corporelle ? Combien de temps leur faudra-t-il s'ils travaillent à 35% de leur  $VO_2$ max ?

# Transport

- Pour faire avancer la gondole à 9,5 km/h (2,64 m/s), le VO<sub>2</sub> nécessaire est :

$$VO_{2\text{absolu}}_{\text{nécessaire}} = 0,44 * v^{2,67} = \mathbf{5,87 \text{ L/min}}$$

- En travaillant à une puissance aérobie relative de 47 %VO<sub>2</sub>max, le VO<sub>2</sub> du cheval est de :

$$VO_{2\text{absolu}}_{\text{cheval}} \left[ \frac{\text{L}}{\text{min}} \right] = \frac{P_{\text{aérobie}}_{\text{relative}} [\%VO_{2\text{max}}]}{100} * \frac{VO_{2\text{max}} \left[ \frac{\text{mL}}{\text{kg} \cdot \text{min}} \right]}{1000} * \text{masse}_{\text{cheval}} [\text{kg}]$$
$$VO_{2\text{absolu}}_{\text{cheval}} = \frac{47}{100} * \frac{150}{1000} * 500 = \mathbf{35,25 \text{ L/min}}$$

- En considérant les hypothèses, le nombre de gondoles que comprend ce train est :

$$\text{Nbre gondole} = \frac{VO_{2\text{absolu}}_{\text{cheval}}}{VO_{2\text{absolu}}_{\text{nécessaire}}} = \frac{35,25}{5,87} = \mathbf{6}$$

# Transport

- La masse totale du train de gondole est de :

$$mase_{train} = Nbre\ gondoles * masse_{unitaire\ gondole} = 6 * 750 = \mathbf{4500\ kg}$$

- Sachant que la des sujets avec le sac à dos est 73 kg et qu'ils transportent alors 44 % de cette masse, le nombre de sujets nécessaire pour faire le même travail que le cheval est de :

$$Nbre\ militaire = \frac{mase_{train}[kg]}{mase_{militaire}[kg] * \frac{charge\ du\ sac\ [\%\ de\ la\ masse]}{100}} = \frac{4500}{73 * 0,44} = \mathbf{140}$$

- Sachant que le VO<sub>2</sub>max spécifique des sujets avec le sac à dos est de 50,8 mL/kg/min et qu'ils travaillent à 35 % du VO<sub>2</sub>max, leur VO<sub>2</sub> est de :

$$VO_{2\militaire} = VO_{2\spec\max} \left[ \frac{mL}{kg.\min} \right] * \frac{P_{aerobie\ relative} [\%VO_{2\max}]}{100} = 50,8 * 0,35 = \mathbf{17,78 \frac{ml}{kg.\min}}$$

# Transport

- En récupérant les résultats de la première question de l'activité, on peut alors retrouver par identification la vitesse de marche des militaires pour la VO2 spécifique calculé : **4,82 km/h**

		Charge placée dans le sac à dos en % de la masse du sujet				
		Bunc & Dlouha	Looney et al. Applied Ergonomics 2021			
Vitesse de marche		VO2 spécifique (mL O2 / kg / min)				
m/sec	km/h	0%	0%	22%	44%	66%
1,16	4,18	10,66	11,62	12,88	15,98	19,61
1,25	4,50	11,69	12,09	13,82	16,35	21,03
<b>1,34</b>	<b>4,82</b>	<b>12,80</b>	<b>12,87</b>	<b>14,76</b>	<b>17,81</b>	<b>23,02</b>
1,43	5,15	13,99	13,44	15,76	19,65	24,85
1,52	5,47	15,26	14,75	17,33	21,43	26,37
1,61	5,80	16,61	16,11	19,26	23,84	30,62
1,7	6,12	18,04	17,31	21,2	26,99	33,98
1,79	6,44	19,54	19,09	23,51	28,51	
1,88	6,77	21,13	21,29	26,18	33,28	
1,97	7,09	22,80	22,60	30,39	36,01	

- Sachant que le cheval avance à 9,5 km/h pendant 1h, la distance parcouru est de 9,5 km. Il faudrait donc **1,97 h** ( $9,5/4,82$ ). Le cheval est donc capable de remplacer 140 sujets tout allant deux fois plus vite.



**Merci de votre attention !**

Si vous avez des questions à formuler, veuillez les poser par écrit et spécifier le nom et le numéro de la présentation. Nous vous répondrons le plus rapidement possible.

# Période de questions

