

23. Énergie Métabolique

23.4.1 – Application - Marche et course sur terrain plat

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.

Marche et course sur terrain plat

- L'énergie mécanique développée sur terrain plat est nulle en raison de l'absence de dénivelé :

$$E_{\text{mécanique}} = mgh = 0$$

- En revanche, celle métabolique ne l'est pas et peut être déterminée par différentes équations empiriques. Ces équations donnent des résultats en termes de $VO_{2\text{spécifique}}$ exprimés en mL/kg/min

Marche et course sur terrain plat

- Pour la marche : équations de Bunc et Dlouha (J Sports Med Phys Fitness 1997) :

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

$$v \in [3; 12]\text{km/h}$$

- Pour la course : équations de Léger et Mercier (Sports Medicine 1984) :

$$VO_{2\text{spécifique}}[\text{mL/kg/min}] = 2.209 + 3.163 * v + 5,25542 * 10^{-4} * v^3$$

$$v \in [5; 24]\text{km/h}$$

Marche et course sur terrain plat

1) Pour des vitesses situées entre 3 et 24 km/h (par pas de 0,5 km/h), déterminez les $VO_{2\text{spécifique}}$ (en mL/kg/min et en mL/kg/km), les coûts (kcal/kg/km) et les puissances (W/kg) pour la marche et la course.

- Présentez les résultats obtenus sous forme de graphiques.
- Notez que pour toutes ces variables il y a une zone de transition d'environ 1 km/h, entre la marche et la course, et réciproquement, quand v augmente ou diminue. Quelles sont les limites inférieure et supérieure approximatives de cette zone, en km/h.

Marche et course sur terrain plat

Dans un premier temps, on peut prendre un cas particulier pour calculer l'ensemble des paramètres demandés :

Prenons l'exemple d'une vitesse de 10 km/h en course à pieds.

Selon l'équation de Léger et Mercier, on a :

$$VO_{2\text{spécifique}} [\text{mL/kg/min}] = 2.209 + 3.163 * 10 + 5,25542 * 10^{-4} * 10^3 = \mathbf{34,37 \text{ mL/kg/min}}$$

$$VO_{2\text{spécifique}} [\text{mL/kg/km}] = \frac{VO_{2\text{spécifique}} [\text{mL/kg/min}]}{v [\text{km/min}]}$$

$$VO_{2\text{spécifique}} = \frac{34,37}{\frac{10}{60}} = \mathbf{206,19 \text{ mL/kg/km}}$$

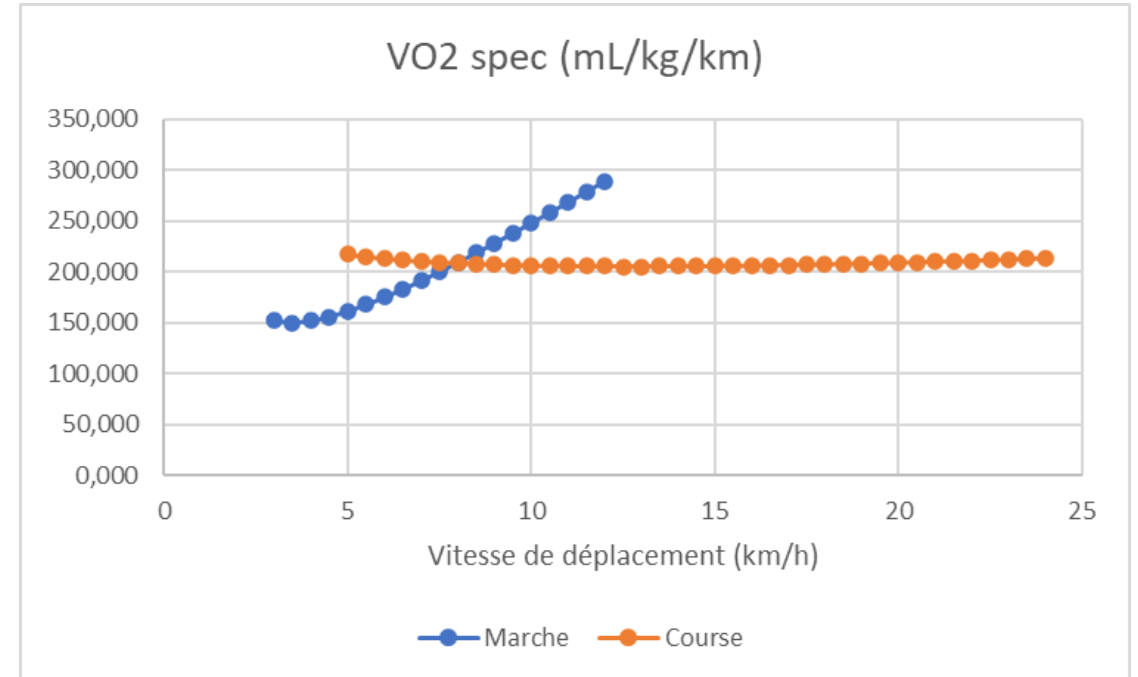
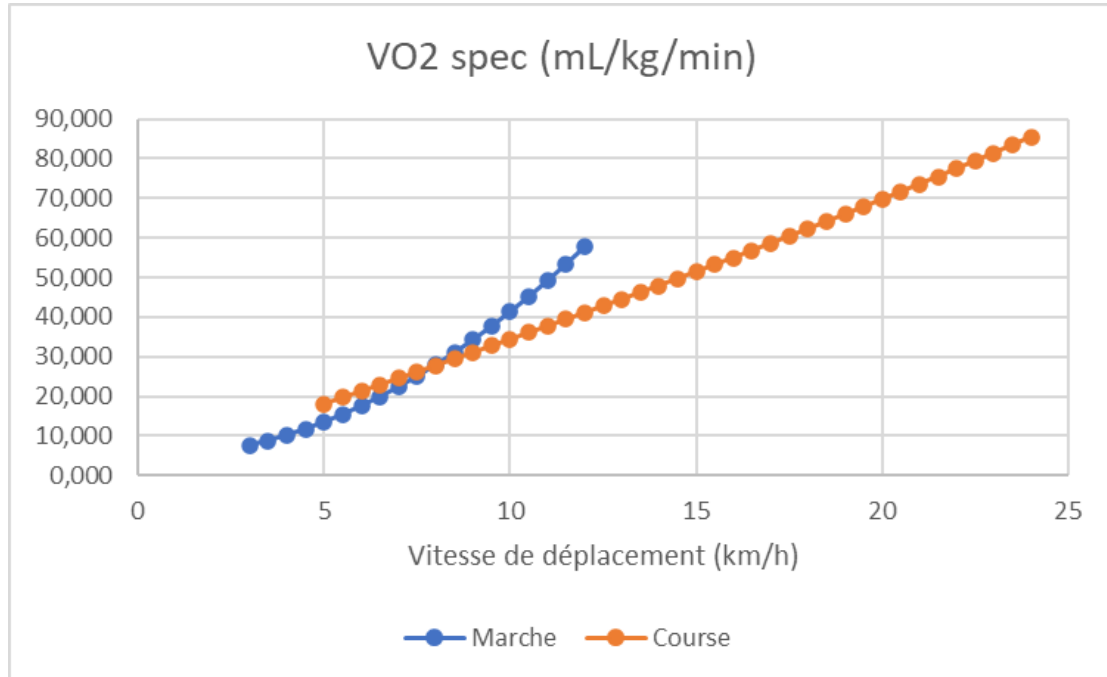
$$\text{Coût}_{\text{énergétique}} [\text{kcal/kg/km}] = VO_{2\text{spécifique}} [\text{mL/kg/km}] * \frac{5}{1\,000} \left[\frac{\text{kcal}}{\text{mLO}_2} \right]$$

$$\text{Coût}_{\text{énergétique}} = 206,19 * \frac{5}{1\,000} = \mathbf{1,031 \text{ kcal/kg/km}}$$

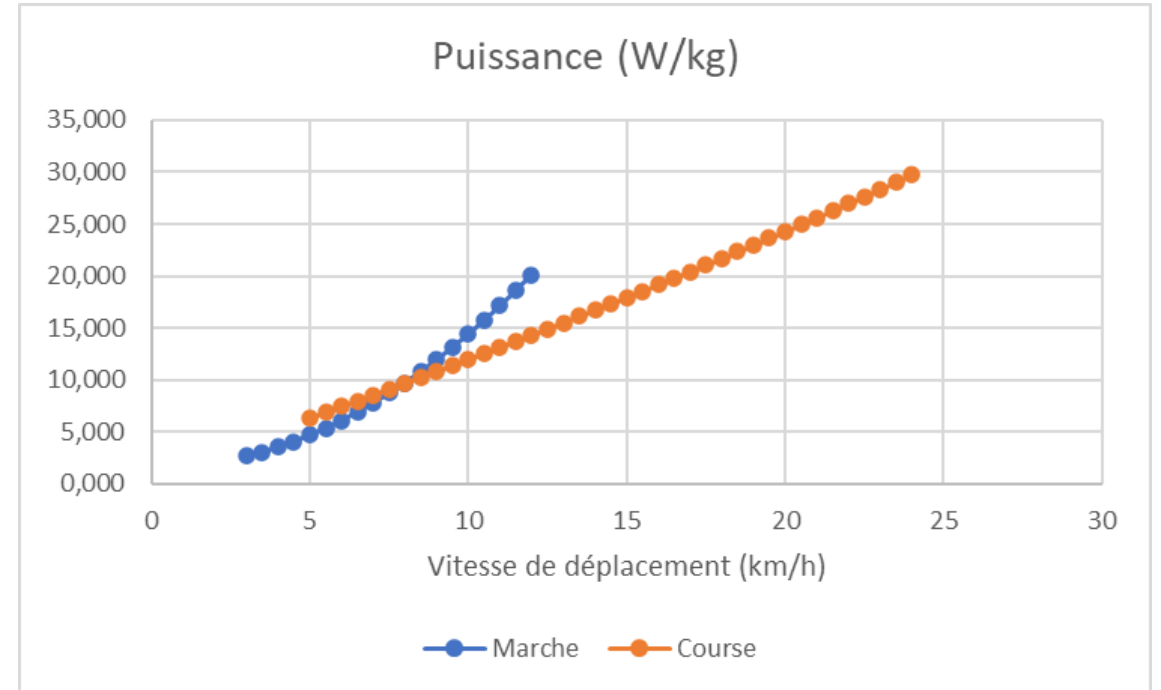
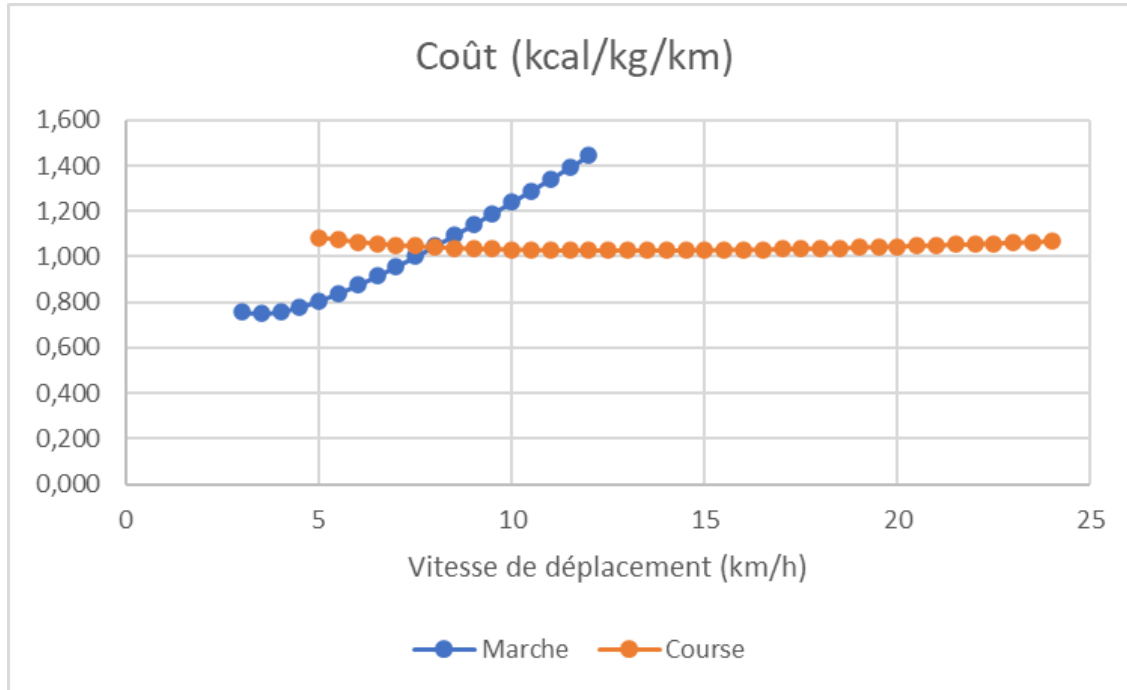
$$\text{Puissance} \left[\frac{\text{W}}{\text{kg}} \right] = VO_{2\text{spécifique}} [\text{mL/kg/min}] * \frac{5}{1\,000} \left[\frac{\text{kcal}}{\text{mLO}_2} \right] * \frac{1}{60} \left[\frac{\text{min}}{\text{sec}} \right] * C_p \left[\frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{kg}} \right]$$

$$\text{Puissance} = 34,37 * \frac{5}{1000} * \frac{1}{60} * 4184 = \mathbf{11,98 \frac{W}{kg}}$$

Marche et course sur terrain plat R1



Marche et course sur terrain plat R1



Le coût en kcal/kg/km est presque identique quelque soit la vitesse pour le cas de la course à pieds. En revanche, le coût en kcal/kg/min varie selon la vitesse de déplacement. Pour certaines vitesses de déplacement (supérieures à 7,5 km/h), il est plus économique de courir que de marcher.

Marche et course sur terrain plat

Une personne de 48 kg effectue une randonnée de 15 km sur le plat en 3 heures.

2) Quel est le coût énergétique de cette activité en kcal et en METs ?

3) Quelle est la puissance moyenne soutenue en watts ?

Marche et course sur terrain plat

2) Vitesse moyenne : 15 km en 3 heures --> 5 km/h

Avec les résultats de la question 1, on connaît les informations suivantes :

$$VO_{2\text{ spécifique}} = 13,436 \text{ mL/kg/min} = 161,232 \text{ mL/kg/km}$$

$$\text{Coût énergétique} = 0,806 \text{ kcal/kg/km}$$

$$\text{Puissance} = 4,685 \text{ W/kg}$$

Coût énergétique absolu de l'activité :

$$C_{\text{absolu}} = \text{Coût énergétique} [\text{kcal/kg/km}] * m [\text{kg}] * d [\text{km}]$$

$$C_{\text{absolu}} = 0,806 * 48 * 15 \text{ kcal}$$

$$\mathbf{C_{\text{absolu}} = 580 \text{ kcal}}$$

Marche et course sur terrain plat

2) Un MET correspondant à une consommation d'oxygène au repos de 3,5 mL/kg/min.

Dans cet exemple, la consommation d'oxygène est de 13,436 mL/kg/min.

Le coût énergétique de cette activité est donc équivalent à :

$$C = \frac{13,436}{3,5} = \mathbf{3,84 METs}$$

3) Puissance moyenne soutenue durant l'activité :

$$P[W] = P \left[\frac{W}{kg} \right] * m[kg]$$

$$P = 4,685 * 48 = \mathbf{224,9 W}$$

Marche et course sur terrain plat

4) Une personne de 66 kg dont le $\dot{V}O_{2\max}$ est de 3.560 L/min court un marathon (42.195 km) à 76 % de son $\dot{V}O_{2\max}$.

- a) Quelle est sa performance en h:min:sec ?
- b) Quelle est le coût énergétique total de sa course ?
- c) Quelle est la puissance moyenne soutenue, en watts ?
- d) Quelle quantité de chaleur a été produite, en joules ?

Marche et course sur terrain plat

4) a) Durant l'effort, le $VO_{2\text{spécifique}}$ est égal à 76 % du $VO_{2\text{max}}$:

$$VO_{2\text{spécifique}} = 0,76 * 3,560 = 2,706 \text{ L/min}$$

$$VO_{2\text{spécifique}} [\text{mL/kg/min}] = \frac{2,706 \left[\frac{\text{L}}{\text{min}} \right]}{66 [\text{kg}]} * 1\,000 \left[\frac{\text{mL}}{\text{L}} \right] = 40,99 \text{ mL/kg/min}$$

On peut ensuite trouver la vitesse moyenne du coureur en résolvant le polynôme du troisième degré suivant (équation de Léger et Mercier) :

$$40,99 = 2.209 + 3.163 * v + 0.000525542 * v^3$$

On trouve une vitesse moyenne de 11,98 km/h (disons 12 km/h).

Les 42,195 km sont donc bouclés en 12 659 secondes ou 3h30min59secondes.

Marche et course sur terrain plat

b) En considérant une vitesse moyenne de 12 km/h, on peut utiliser les données obtenues dans la question 1 :

$$\begin{aligned}VO_{2\text{ spécifique}} &= 41,073 \text{ mL/kg/min} = 205,366 \text{ mL/kg/km} \\ \text{Coût}_{\text{énergétique}} &= 1,027 \text{ kcal/kg/km} \\ \text{Puissance} &= 14,321 \text{ W/kg}\end{aligned}$$

Le coût énergétique total de sa course est donc de :

$$\begin{aligned}C_{\text{absolu}} &= \text{Coût}_{\text{énergétique}} [\text{kcal/kg/km}] * m[\text{kg}] * d[\text{km}] \\ C_{\text{absolu}} &= 1,027 * 66 * 42,195 \text{ kcal} \\ \mathbf{C_{\text{absolu}} = 2\ 860 \text{ kcal}}\end{aligned}$$

Marche et course sur terrain plat

c) Puissance moyenne soutenue durant l'activité :

$$P[W] = P \left[\frac{W}{kg} \right] * m[kg]$$

$$P = 14,321 * 66 = \mathbf{945,2 W}$$

d) La quantité de chaleur produite est la suivante (toute l'énergie dissipée l'est sous forme de chaleur) :

$$Q[Wh] = P[W] * t[h]$$

$$Q = 945,2 * 3,52 \text{ (nombre d'heure de la course)}$$

$$Q = 3\,324 Wh$$

$$Q = \mathbf{1,2 * 10^7 J}$$

Marche et course sur terrain plat

- Une partie de cette chaleur est accumulée dans l'organisme dont la capacité thermique massique est de 3.5 kJ/K/kg . C'est la raison pour laquelle la température centrale augmente au cours de l'exercice.
- Le reste de la chaleur est dissipé par conduction, convection et évaporation dans des proportions variables selon la façon dont le sujet est habillé et protégé ou non du vent, et selon l'humidité relative qui favorise l'évaporation de la sueur quand elle est basse, et inversement.

Marche et course sur terrain plat

- Pour l'exemple choisi on suppose que les conditions atmosphériques sont favorables à la perte de chaleur (la thermolyse) et que :
 - La température du sujet augmente de 2.2 K (de 37 à 39.2 °C);
 - 60 % de la chaleur dissipée est perdue par évaporation de la sueur dont la chaleur latente est celle de la vaporisation de l'eau (2260 kJ/L évaporé);
 - Le reste de la chaleur perdue est dissipée à part égale par la conduction et la convection.

5) Quelle est la quantité de sueur perdue par le sujet si 80 % de la sueur produite est évaporée ? (en général une partie de la sueur produite ne contribue pas à la thermolyse car elle ruisselle ou détrempe les vêtements)

Marche et course sur terrain plat

5) Energie accumulée dans le corps de l'athlète :

$$E_{corps} = c \left[\frac{kJ}{kg \cdot K} \right] * m[kg] * \Delta T[K]$$
$$E_{corps} = 3,5 * 66 * 2,2 = 508,2 \text{ kJ}$$

La chaleur dissipée est donc de :

$$E_{dissipée}[kJ] = Q[kJ] - E_{corps}[kJ]$$
$$E_{dissipée} = 1,2 * 10^4 - 508,2 = 1,15 * 10^4 \text{ kJ}$$

60 % de cette chaleur ($6,88 * 10^3 \text{ kJ}$) est perdue par évaporation de la sueur.
Quantité de sueur produite :

$$V_{sueur}[L] = \frac{E_{sueur}[kJ]}{0,8[\%] * l_{vaporisation} \left[\frac{kJ}{L} \right]}$$
$$V_{sueur}[L] = \frac{6,88 * 10^3}{0,8 * 2\,260} = 3,75 \text{ L}$$

La sueur évaporée correspond à 80% de ce volume et est donc de 3,0 litres.

Marche et course sur terrain plat

- Sur le plan bioénergétique, la performance au marathon dépend de trois facteurs :
 - le $VO_{2max_{spéc}}$ (plus il est haut, meilleure est la performance);
 - le coût énergétique de la course (plus il est bas, meilleure est la performance);
 - l'endurance qui est la capacité de maintenir longtemps une haute puissance aérobie relative ($\%VO_{2max}$; plus ce pourcentage est haut, meilleure est la performance).
- Ces trois facteurs s'améliorent avec l'entraînement. En outre le coût énergétique de la course peut être légèrement diminué par certaines chaussures.

Marche et course sur terrain plat

6) Quelle serait la performance réalisée par le coureur pris en exemple :

- a) si son VO_{2max} augmente de 2 % ?
- b) si le coût énergétique de sa course diminue de 1.5 % ?
- c) si le pourcentage VO_{2max} soutenu pendant la course augmente de 76 à 78 % ?
- d) si toutes ces améliorations sont cumulées ?

Marche et course sur terrain plat

6) a) Si le VO_{2max} augmente de 2%, son $VO_{2spécifique}$ est désormais de :

$$VO_{2spécifique} \left[\frac{L}{min} \right] = 1,02[\%] * 0,76[\%] * 3,560 \left[\frac{L}{min} \right] = 2,76 \text{ L/min}$$

$$VO_{2spécifique} [\text{mL/kg/min}] = \frac{2,76[\text{L/min}]}{66[\text{kg}]} * 1\,000 \left[\frac{\text{mL}}{\text{L}} \right] = 41,82 \text{ mL/kg/min}$$

On peut ensuite trouver la vitesse moyenne du coureur en résolvant le polynôme du troisième degré suivant (équation de Léger et Mercier) :

$$41,82 = 2.209 + 3.163 * v + 0.000525542 * v^3$$

On trouve une vitesse moyenne de 12,22 km/h.

Les 42,195 km sont donc bouclés en 12 431 secondes ou 3h27min11secondes, soit 3min48secondes plus rapidement que le cas de référence.

Marche et course sur terrain plat

b) On fait l'hypothèse que le coût énergétique de la course diminue de 1.5 %. Cela veut simplement dire que pour le même VO_2 spécifique (il reste le même) la vitesse est supérieure de 1.5 % à celle donnée par l'équation de Léger.

Ainsi, la nouvelle vitesse moyenne du coureur sur l'épreuve est de :

$$12,0 * 1,015 = 12,18 \text{ km/h}$$

Les 42,195 km sont donc cette fois-ci bouclés en 12 471 secondes ou 3h27min51secondes, soit 3min08secondes plus rapidement que le cas de référence.

Marche et course sur terrain plat

c) si le pourcentage VO_{2max} soutenu pendant la course augmente de 76 à 78 %, son $VO_{2spécifique}$ est désormais de :

$$VO_{2spécifique} \left[\frac{L}{min} \right] = 0,78[\%] * 3,560 \left[\frac{L}{min} \right] = 2,78 \text{ L/min}$$

$$VO_{2spécifique} [mL/kg/min] = \frac{2,78 [L/min]}{66 [kg]} * 1\,000 \left[\frac{mL}{L} \right] = 42,07 \text{ mL/kg/min}$$

- On peut ensuite trouver la vitesse moyenne du coureur en résolvant le polynôme du troisième degré suivant (équation de Léger et Mercier) :

$$42,07 = 2.209 + 3.163 * v + 0.000525542 * v^3$$

- On trouve une vitesse moyenne de 12,29 km/h.
- **Les 42,195 km sont donc bouclés en 12 360 secondes ou 3h26min00secondes, soit 4min59secondes plus rapidement que le cas de référence.**

Marche et course sur terrain plat

d) si toutes ces conditions sont réunies, le VO_{2max} augmente de 2% tout en étant capable de soutenir 78% de ce dernier pendant la durée de l'effort. Ainsi :

$$VO_{2spécifique} \left[\frac{L}{min} \right] = 1,02[\%] * 0,78[\%] * 3,560 \left[\frac{L}{min} \right] = 2,83 \text{ L/min}$$
$$VO_{2spécifique} [\text{mL/kg/min}] = \frac{2,83[\text{L/min}]}{66[\text{kg}]} * 1\,000 \left[\frac{\text{mL}}{\text{L}} \right] = 42,91 \text{ mL/kg/min}$$

On peut ensuite trouver la vitesse moyenne du coureur en résolvant le polynôme du troisième degré suivant (équation de Léger et Mercier) :

$$42,91 = 2.209 + 3.163 * v + 0.000525542 * v^3$$

On trouve une vitesse moyenne de 12,54 km/h.

Marche et course sur terrain plat

d) On fait également l'hypothèse que le coût énergétique de la course diminue de 1.5 %. Ainsi, la nouvelle vitesse moyenne du coureur sur l'épreuve est de :

$$12,54 * 1,015 = 12,73 \text{ km/h}$$

En prenant en compte toutes ces améliorations, les 42,195 km sont donc bouclés en 11 934 secondes ou 3h18min54secondes, soit 12min05secondes plus rapidement que le cas de référence.

Pour des courses de fond, l'entraînement n'est donc absolument pas négligeable. Une légère amélioration des performances permet des écarts considérables sur le résultat final.

C'est notamment pour cette raison que les coureurs de longues distances font régulièrement des stages à haute altitude (Iten au Kenya) pour améliorer leur performance comme leur VO_{2max} ou leur endurance à l'effort.

Marche et course sur terrain plat

- Aujourd'hui, les records officiels sur marathon sont les suivants :
 - Chez les hommes : Eliud Kipchoge --> 2h01min39sec (2018)
 - Chez les femmes : Brigid Kosgei --> 2h14min04sec (2019)
- La légende du marathon vient de Grèce. Cette légende raconte que Phillippidès à parcourut les 40 kilomètres entre Marathon et Athènes pour annoncer la victoire sur les Perses (490 av. J.C.) et qu'il mourut d'épuisement à son arrivé.
- Selon Hérodote, Phillippidès aurait en réalité parcourut en moins de deux jours 250 kilomètres pour venir chercher de l'aide à Sparte pour combattre les Perses. Il ajoute qu'il n'en mourut pas pour autant car il repartit aussitôt pour Athènes.

Marche et course sur terrain plat

- Cette performance est tout à fait possible au regard de celles réalisées aujourd'hui :
- Spartathlon (246km):
 - Chez les hommes : 20h25min00sec par Yannis Kouros (1984)
 - Chez les femmes : 24h48min18sec par Patrycja Bereznowska (2017)
- Plus grande distance en 24 heures :
 - Chez les hommes : 309,4 km par Aleksandr Sorokin en 2021
 - Chez les femmes : 270,1 km par Camille Herron en 2019
- Plus grande distance en 48 heures :
 - Chez les hommes : 473,8 km par Yannis Kouros en 1996
 - Chez les femmes : 397,1 km par Sumie Inagaki en 2014

Marche et course sur terrain plat

7) Au regard des performance présentées dans la diapositive précédente, déterminez les $VO_{2\text{spécifique}}$ et les $VO_{2\text{relatif}}$ pour ces coureurs et sur ces distances.

- On suppose que leurs $VO_{2\text{max}}$ sont de 85 et 75 ml/kg/min respectivement pour les hommes et les femmes.
- L'endurance est-elle plus élevée chez les coureurs féminins ou masculins ?

Marche et course sur terrain plat

7)

		Données	Données	Distance / Temps	Formule de Léger et Mercier	VO2 spec / VO2 max	VO2 spec * temps (min)	VO2 relatif * 5 / 1000
		Distance (km)	Temps (h)	Vitesse moyenne (km/h)	VO2 spec (mL/kg/min)	%VO2 max	VO2 relatif (mL/kg)	Coût relatif (kcal/kg)
Hommes	Kipchoge	42,2	2,0	20,81	72,77	85,6%	8 853	44,3
	Kouros	246,0	20,4	12,05	41,24	48,5%	50 518	252,6
	Sokorin	309,4	24,0	12,89	44,11	51,9%	63 520	317,6
	Kouros	473,8	48,0	9,87	33,94	39,9%	97 735	488,7
Femmes	Kosgei	42,2	2,2	18,88	65,48	87,3%	8 778	43,9
	Bereznowska	246,0	24,8	9,92	34,09	45,5%	50 736	253,7
	Herron	270,1	24,0	11,25	38,56	51,4%	55 519	277,6
	Inagaki	397,1	48,0	8,27	28,67	38,2%	82 581	412,9

L'endurance chez un homme ou une femme sont quasiment similaire.



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

