

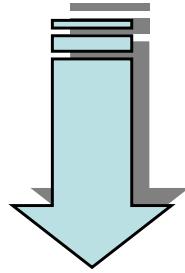
Coût énergétique de la locomotion dans différentes activités sportives



Fred Grappe 2006

I - Généralités sur le *CE*

Constat



Les vitesses de déplacement dans les différents sports à dominante aérobie sont très différentes

MAIS...

Les P_{\max} des athlètes de haut niveau sont très proches

La différence de vitesse pour une puissance donnée entre les différents sports est due au *CE* de la locomotion

Coût énergétique (métabolique)

($\text{mlO}_2 / \text{min} / \text{kg} / \text{m}$)

Coût mécanique

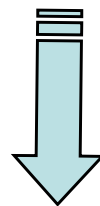
($\text{J} / \text{m} / \text{kg}$)



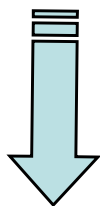
Dépense énergétique
par unité de distance

Grande variabilité interindividuelle du CE

Pour une même $VO_2\text{max}$ CE est une des variable qui influence le plus la performance en endurance.

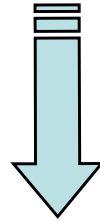


Variabilité de la perf. entre 15-20% pour une même $VO_2\text{max}$

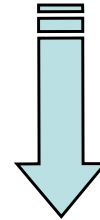


car variabilité interindividuelle du même ordre pour CE

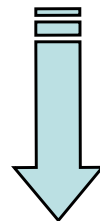
Faible variabilité intra-individuelle du CE



Lorsque la mesure est répétée le CV = 1,6%, 1,8%, 4,6% selon les études.



Indépendant des variations de fréquence de foulée en càp



CV peut être amélioré avec le contrôle de la technique, le type de chaussure et l'entraînement

CE en càp

Excellent = 150 mlO₂/kg/km

Médiocre = 260 mlO₂/kg/km

+ 73%

Equations élémentaires

$$CE = VO_2 \cdot V_d^{-1}$$

$$VO_2 = CE \cdot V_d$$

$$V_d = VO_2 \cdot CE^{-1}$$



CE = économie de la locomotion

Fred Grappe 2006

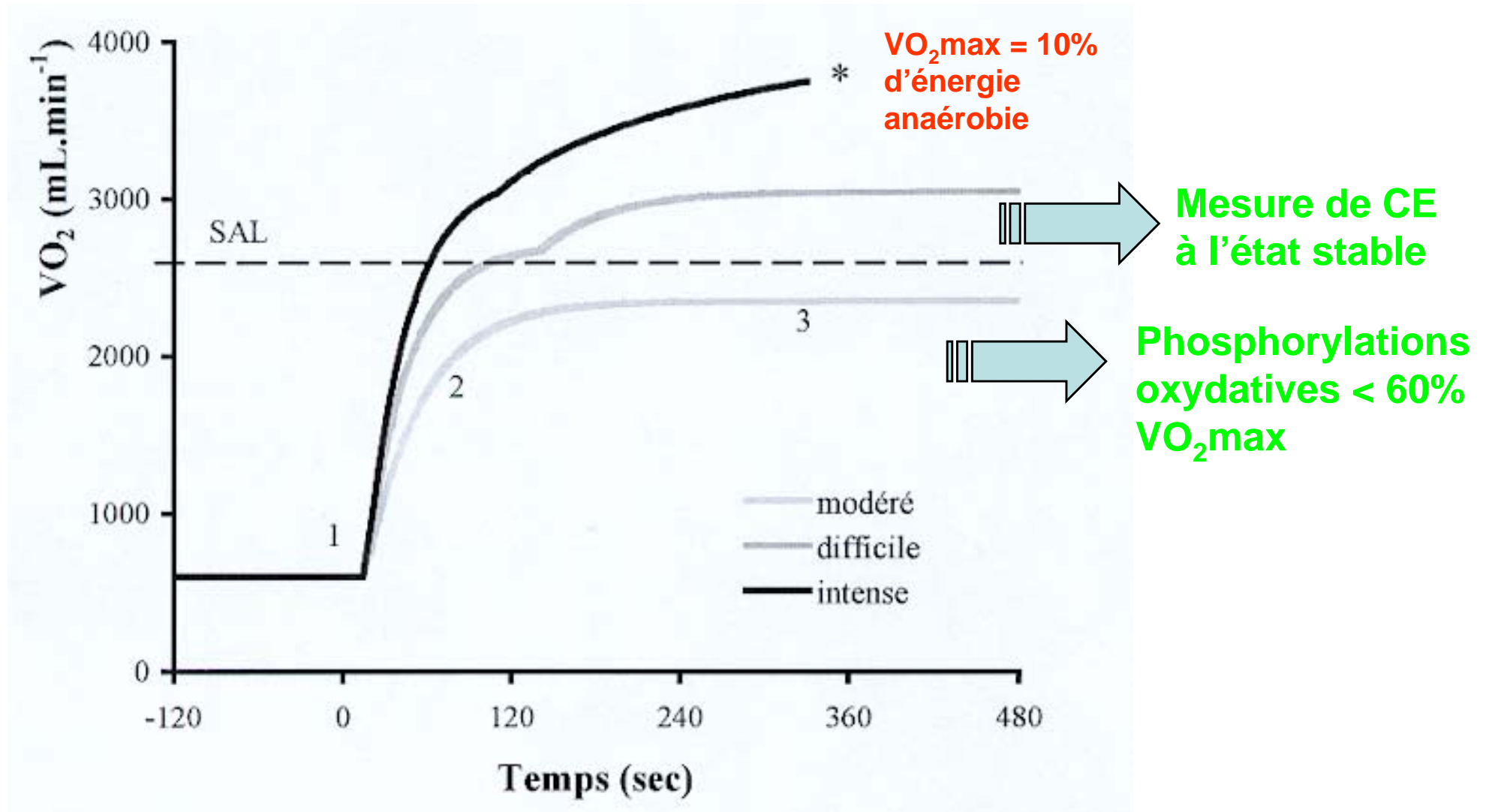
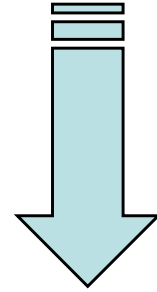


Figure 1. Représentation schématique de l'évolution temporelle de la VO_2 pour un exercice à charge constante en fonction du domaine d'intensité de l'exercice (modéré, difficile et intense). Les nombres 1, 2 et 3 représentent les trois phases caractéristiques de la cinétique de VO_2 . * indique la consommation maximale d'oxygène (VO_{2max}). SAL est le seuil d'accumulation des ions lactates sanguin (d'après Perrey et Candau, 2002).




On distingue :

CE brut et **CE** net

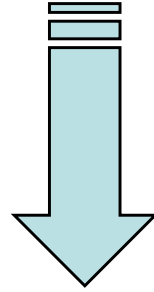
CE peut être exprimé en J/m/kg



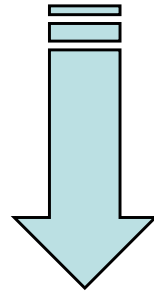
**Equivalent énergétique (en KJ) d'1 litre d'O₂ (E_{O₂})
en fonction des substrats utilisés**

Oxydation des lipides : QR = 0,71		1lO ₂ = 19,6 kJ
Oxydation G + L : QR = 0,9		1lO ₂ = 21 kJ
Oxydation G + L : QR = 1,0		1lO ₂ = 21,3 kJ

Pour une oxydation comprenant à la fois des lipides et des glucides

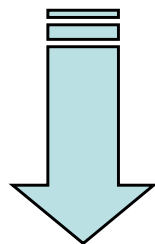


Estimation de l'équivalent énergétique du litre d'O₂ (E_{O₂})



$$E_{O_2} = 71 [QR - 0,7) + 65,3 [1 - QR)]$$

Estimation de l'équivalent énergétique du litre d'O₂ (E_{O2})



QR	E _{O2} (KJ)
0.7	19.6
0.75	19.9
0.8	20.2
0.85	20.5
0.9	20.7
0.95	21.0
1	21.3
1.05	21.6
1.1	21.9
1.15	22.2
1.2	22.4
1.25	22.7
1.3	23.0

- } Intensité légère (I1)
- } Intensité moyenne (I2)
- } Intensité soutenue (I3)
- } Intensité seuil (I4)
- } Intensité sur-critique (I5)
- } Intensité sous max (I6)

CR10

• 0,3 - 1

.....

• 5 - 6

• 7- 8

Calcul de l'énergie métabolique en Joule

$$\text{Energie métabolique (J/s)} = ([3.869 \times \text{VO}_2] + [1.195 \times \text{VCO}_2]) \times (4.186/60) \times 1000$$

avec : O_2 ($\text{mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$), CO_2 ($\text{mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)

Jeukendrup AE, Craig NP, Hawley JA. The bioenergetics of World Class Cycling. *J Sci Med Sport*. 2000;3: 344-433

Faria EW, Parker DL, Faria IE. The Science of Cycling Factors Affecting Performance – Part 2. *Sports Med*. 2005; 35: 313-37

Estimation des Calories dépensées lors d'un exercice en endurance de longue durée

Pour un QR = 0,9 $E_{O_2} = 20,7 \text{ KJ}$ $1\text{KJ} = 0,238 \text{ Kcal}$

Donc, $1\text{l } O_2 = 0,238 \times 20,7 = 4,92 \text{ Kcal}$

$250 \text{ W pendant } 5\text{h} = 3,3 \text{ l } O_2/\text{min pendant } 5\text{h} = 4,92 \times 3,3$

$= 16,2 \text{ Kcal / min}$

$= 972 \text{ Kcal / h}$

Donc, sur 5h = $5 \times 972 = 4860 \text{ Kcal}$

Exemple de calcul du CE

Un coureur à pieds de 65 kg se déplace à 20 km/h en consommant 4 l/min d'O₂. Quel est le cout énergétique de son déplacement ? On considère qu'il est à son seuil anaérobie donc son QR = 1.

CE en mlO₂/m/kg

$$\begin{aligned}VO_2 &= 4000/65 = 61,5 \text{ mlO}_2/\text{min/kg} \\ &= 1,025 \text{ mlO}_2/\text{sec/kg}\end{aligned}$$

$$CE = 1,025 / (20/3,6) = \mathbf{0,184 \text{ mlO}_2/\text{m/kg}}$$

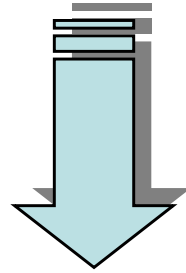
CE en J/m/kg

$$QR = 1 \quad \text{implique} \quad EO_2 = 21,3 \text{ KJ}$$

$$4 \text{ l/min} = 4 \times 21,3 \text{ KJ} = 85,2 \text{ KJ/min} = 1,42 \text{ KJ/sec}$$

$$CE = (1420 / 65) / (20 / 3,6) = 21,8 / 5,55 = \mathbf{3,92 \text{ J/m/kg}}$$

Idéal pour un sportif qui effectue un sport d'endurance



Augmenter VO_2 et diminuer CE

car

$$V_d \text{max} = f \text{ } VO_2 \text{max} \cdot CE^{-1}$$

f = fraction de VO_2 max soutenable durant l'exercice

$f < \text{ou} = 1$

Problématique

**Le CE de la locomotion humaine
est orienté en partie pour faire
face aux résistances externes**

et

**est sous l'influence de nombreux
facteurs mécaniques**

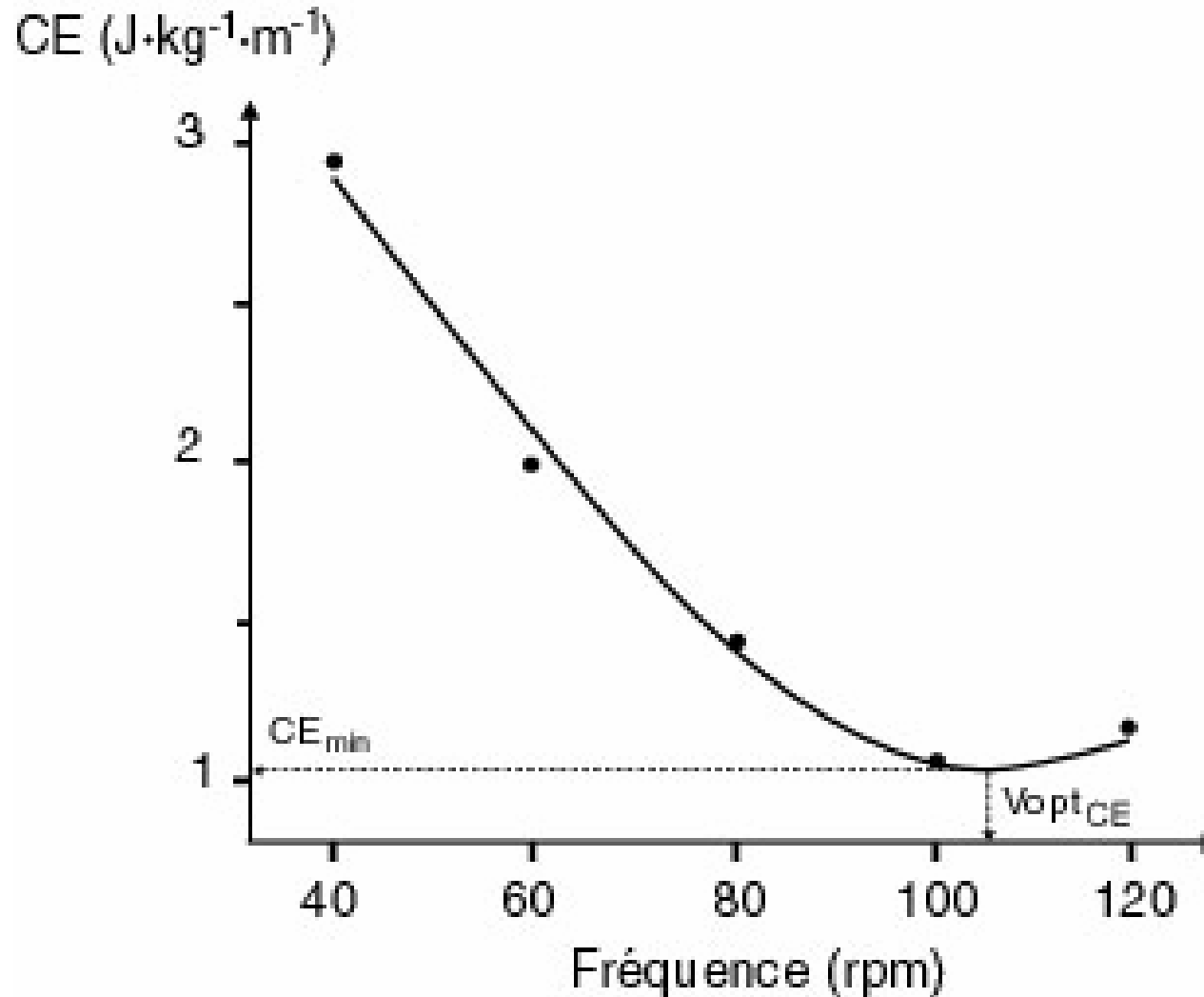
Résistances externes

- Résistance aérodynamique et hydrodynamiques
- Traînée de pression
- Traînée de frottement
- Amélioration du CE en drafting
- Résistances de friction
- Gravité/inclinaison de la pente
- Masse corporelle et charges additionnelles

Facteurs mécaniques

- Vitesse de déplacement
- Fréquence et longueur de cycle
- Puissance mécanique
- Cycle étirement raccourcissement

Relation CE - fréquence gestuelle

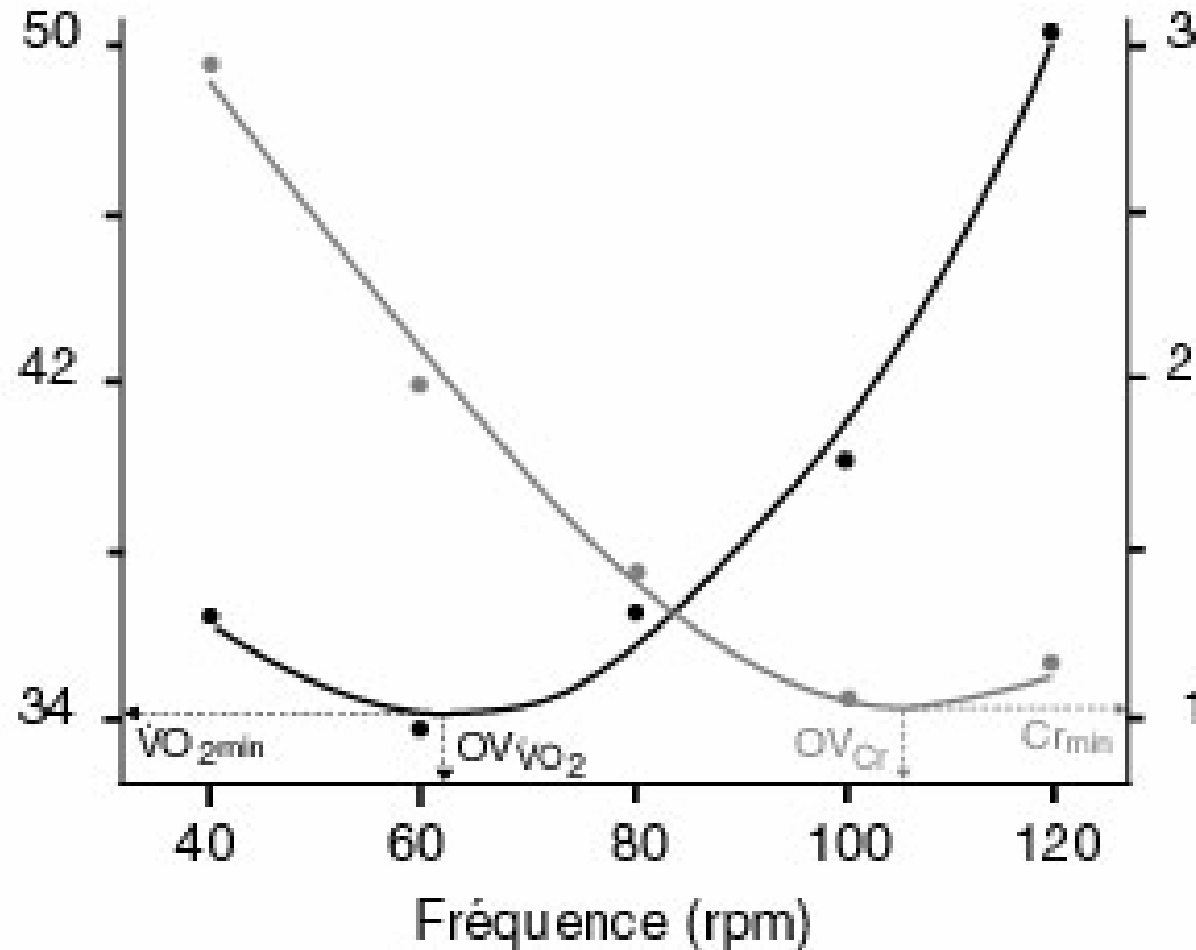


Relation parabolique entre le coût énergétique du déplacement (CE, J/kg/m) et la fréquence de pédalage (rpm) obtenues lors d'un test réalisé sous le seuil anaérobie (Hintzy et coll. sous presse).

Relation $\dot{V}O_2$ - CE - fréquence gestuelle

• $\dot{V}O_2$ ($\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$)

• Cr ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$)



Relations paraboliques entre la fréquence de pédalage (rpm) et 1) la consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$, ml/min/kg) et 2) le coût énergétique du déplacement (CE, J/kg/m) obtenues lors d'un test réalisé sous le seuil anaérobie (Hintzy et coll. sous presse).

II - Caractéristiques communes à différents sports

(marche, course, patinage, cyclisme)

A - Energie dépensée par unité de distance contre R_a

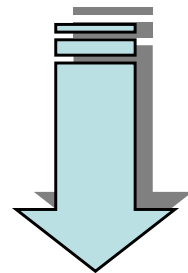
$$CE = VO_2 \cdot V_d^{-1}$$

comme : $\eta = P_{\text{méca}} \cdot VO_2^{-1}$

$$CE = (P_{\text{méca}} \cdot \eta^{-1}) \cdot V_d^{-1}$$

$$CE = P_{\text{méca}} \cdot (\eta \cdot V_d)^{-1}$$

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \text{Comme : } P_{\text{méca}} = R_T \cdot V_d \\
 R_T = R_a + R_r \quad \text{négligeable} \\
 R_T = \frac{1}{2} \rho S C_x V_a^2 + C_r m g \\
 R_T = \frac{1}{2} \rho S C_x (V_d + V_v)^2 \\
 P_{\text{méca}} = \frac{1}{2} \rho S C_x (V_d + V_v)^2 \cdot V_d
 \end{array} \right.$$



$$\mathbf{CE}_{\text{Contre Ra}} = [\rho S C_x (V_d + V_v)^2] \cdot 2 \eta^{-1}$$

En l'absence de vent : $V_a = V_d$

$$CE_{\text{Contre Ra}} = (\rho S C_x V_d^2) \cdot 2 \eta^{-1}$$

$$CE_{\text{Contre Ra}} = R_a \cdot \eta^{-1}$$

**B - Energie dépensée (puissance
métabolique) par unité de temps
contre R_a**

$$\underset{\text{Contre Ra}}{VO_2} = \underset{\text{Contre Ra}}{CE} \cdot V_d$$

$$= (R_a \cdot V_d) \cdot \eta^{-1}$$

$$= P_{\text{ext}} \cdot \eta^{-1}$$

Fraction de $P_{\text{méca}}$ utilisée contre R_a

- Marche : < 10 %
- Patinage : > 50%
- Cyclisme : = 90% à hautes vitesses

III - Caractéristiques spécifiques

Il en résulte que, à l'exception du cyclisme, du patinage... :

Dans les autres sports

$P_{\text{méca}}$ est utilisée presque intégralement pour des causes indépendantes de l'aérodynamisme:

- la gravité : élévation + abaissement du CG
- l'inertie : accélération + décélération (càp ; marche ; cyclisme)
- les frottements
- le travail interne
- les contractions muscul. / maintien de la posture
- activité des muscles respiratoires et du cœur



Dépense
énergétique non
aérodynamique

CE dans différents sports

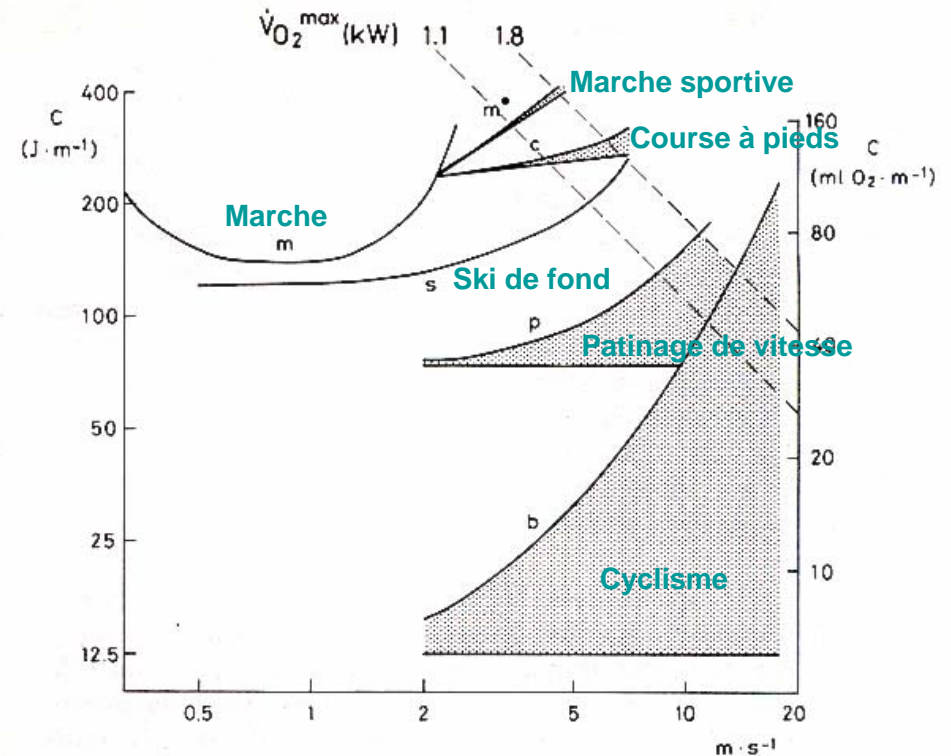


FIG. 97. — Energie dépensée par unité de parcours ($J \cdot m^{-1}$, ou $ml O_2 \cdot m^{-1}$) pour un sujet de 70 kg et 175 cm dans la marche (m) et la marche sportive (m^*), la course (c), le ski de fond (s , « pas de un », température de la neige = $-3^\circ C$), le patinage de vitesse sur glace (p) et le cyclisme (c , bicyclette de course, position abaissée sur le guidon), en fonction de la vitesse ($m \cdot m^{-1}$) : sur terrain plat, solide et uniforme, en l'absence de vent, température de l'air = $20^\circ C$, et pression barométrique = 760 mmHg. Pour chaque type de locomotion, la ligne inférieure indique la dépense d'énergie contre les forces non aérodynamiques, et la ligne supérieure, la dépense totale; la distance (en pointillés) séparant les deux lignes représente donc la dépense contre la résistance de l'air. Pour la marche naturelle ces deux lignes coïncident pratiquement; pour le ski de fond les valeurs en question ne sont pas séparément connues. Puisque les coordonnées sont logarithmiques, tous les points caractérisés par la même puissance ($C \cdot v = \text{Constante}$) se situent sur une même droite dont le coefficient angulaire est $-1,0$: $\log C = \log \text{Constante} - \log v$. Les deux lignes isopuissance indiquées correspondent à la puissance aérobie maximale d'un athlète de haut niveau (1,8 kW) et d'un sujet non athlétique (1,1 kW). Les points d'intersection entre une ligne isopuissance et une fonction donnée indiquent la vitesse aérobie maximale pour la puissance et la locomotion considérées. Pour un athlète de haut niveau, la vitesse aérobie maximale vaut, en $m \cdot s^{-1}$: 4,52; 6,17; 7,00; 10,84; 13,49 pour la marche sportive, la course, le ski de fond, le patinage de vitesse et le cyclisme. Ces valeurs sont en bon accord avec les performances indiquées dans le tableau 21.

(D'après les données de Davies, 1980 b; di Prampero *et al.*, 1976; 1979; Margaria, 1938; Margaria *et al.*, 1963; Menier et Pugh, 1968; Pugh, 1971.)

Puissance métabolique et mécanique en fonction de la vitesse dans différents sports

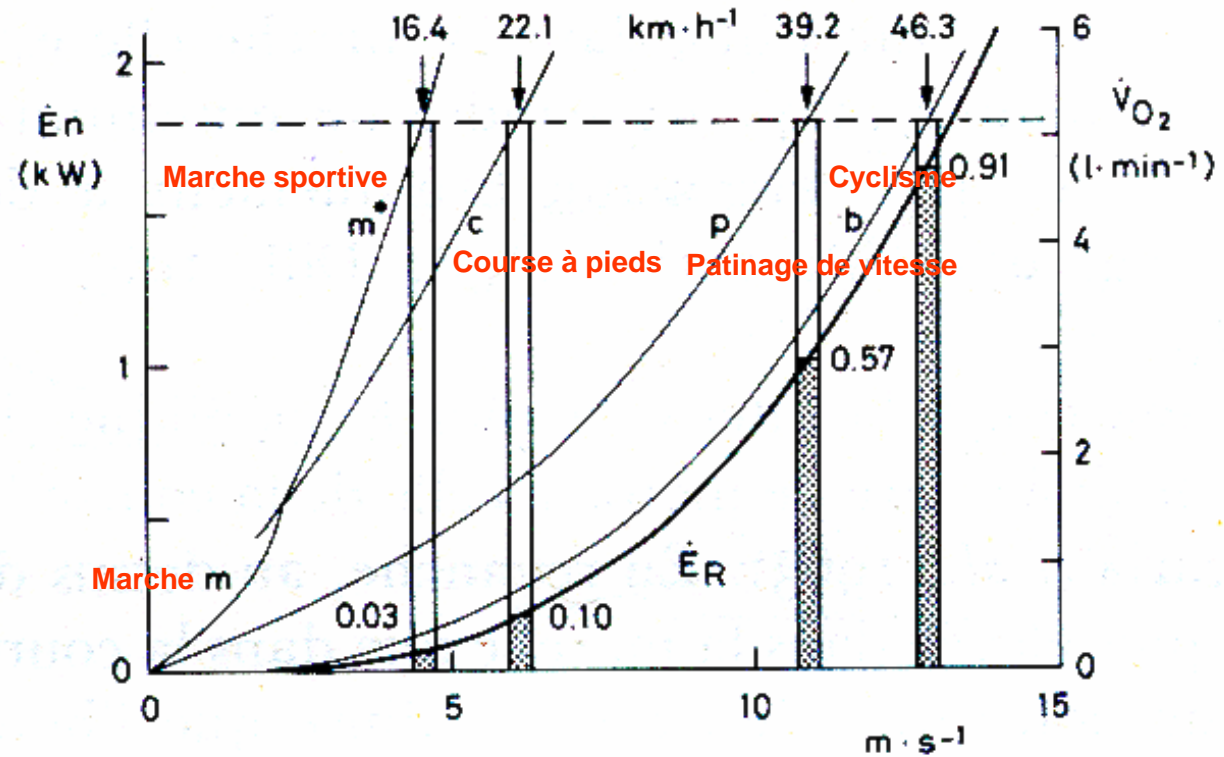


FIG. 98. — Les courbes minces indiquent la puissance métabolique (\dot{E}_n , kW) pour un sujet de 70 kg, 175 cm, en fonction de la vitesse (m/s), dans la marche naturelle (m) et sportive (m^*), la course (c), le patinage de vitesse sur glace (p) et le cyclisme, vélo de course (b) sur terrain plat, en l'absence de vent ($PB = 760$ mmHg, $T = 20$ °C). — La courbe épaisse \dot{E}_R indique la puissance dépensée contre la résistance de l'air, qui est pratiquement égale dans tous les cas considérés (voir tableau 22) (la courbe \dot{E}_R a été tracée sur la base d'une valeur moyenne de $k' = 0,774$ J·s²·m⁻³). La distance verticale entre la courbe \dot{E}_R et les courbes en trait fin indique la puissance métabolique utilisée contre les forces non aérodynamiques. La ligne horizontale en trait discontinu correspond à la puissance aérobique maximale d'un athlète de haut niveau (1,8 kW). A la vitesse maximale, indiquée par le point d'intersection entre les courbes fines et la ligne horizontale, la fraction de l'énergie totale dépensée contre la résistance de l'air est indiquée en hachuré dans chaque colonne avec le pourcentage correspondant. L'échelle de droite indique la puissance métabolique en consommation d'O₂ (1 l O₂ = 20,9 kJ).

IV - Conditions ambiantes et performance

$$R_a = 1/2 \rho S C_x V_a^2$$

$$\rho = \rho_0 (P_B / 760) (273 / T)$$

($\rho_0 = 1.292 \text{ kg/m}^3$; densité de l'air sec à 273°k et 760 mmHg)

L'altitude : diminue CE et VO_2



Car il y a une diminution de $VO_2\text{max}$

Effet opposé sur $V_d\text{max}$

Importance du rapport entre $V_d\text{max}$ en altitude et $V_d\text{max}$ au niveau de la mer

% $\dot{V}O_2$ max exploité en fonction de l'altitude

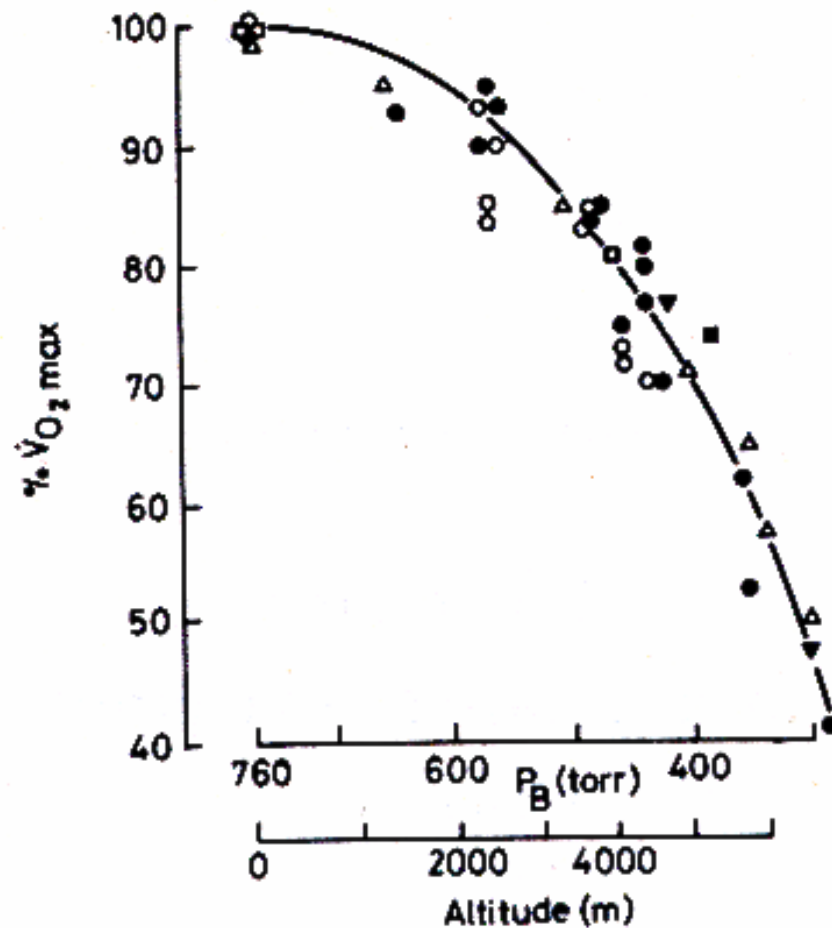


FIG. 68. — $\dot{V}O_2$ max (en pourcentage de la valeur mesurée au niveau de la mer = 100) en fonction de la pression barométrique (P_B) et de l'altitude (m) (symboles ouverts = hypoxie aiguë - \circ -; symboles pleins = hypoxie chronique (\blacktriangledown natifs) - \bullet -).

(Données d'après Åstrand et Rodahl, 1970; Cerretelli et Margaria, 1961; Cerretelli, 1976 a; Elsner et coll., 1964.)

Rapport entre la vitesse maximale (V_{max}) atteinte en altitude et celle atteinte au niveau de la mer (V_{max_0})

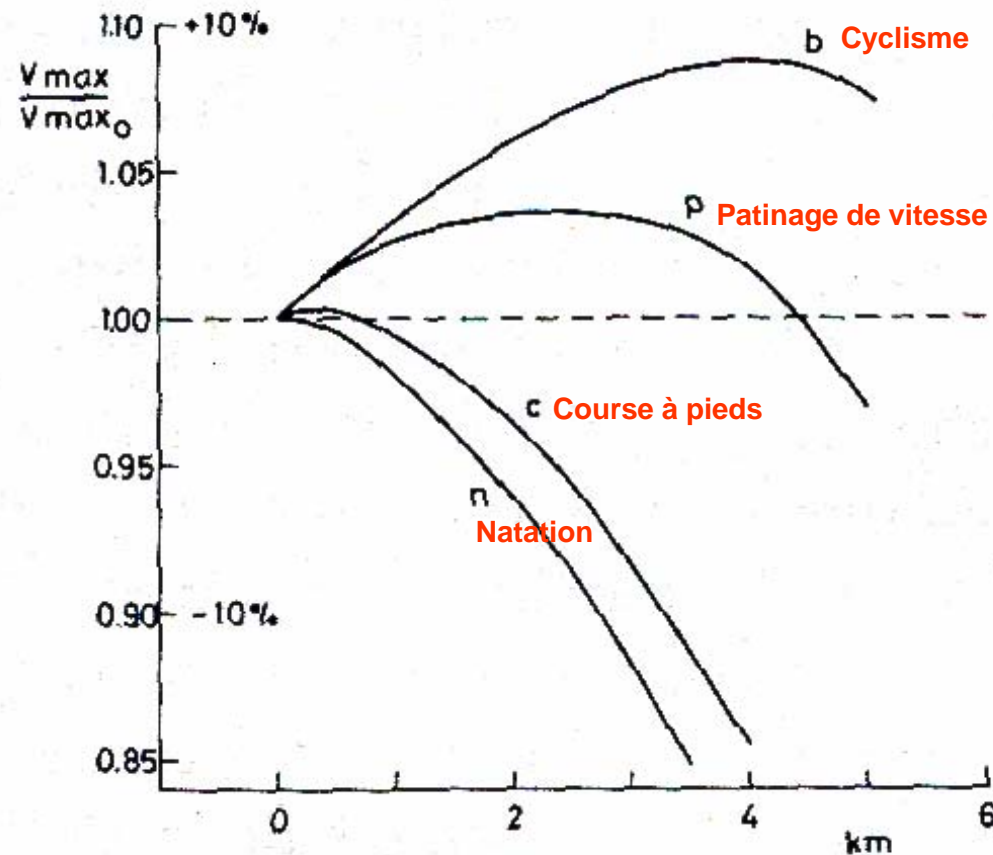


FIG. 100. — Rapport entre la vitesse maximale (v_{max}) atteinte à l'altitude indiquée en abscisse (km) et la vitesse atteinte au niveau de la mer (v_{max_0}) dans la course (c), le patinage de vitesse sur glace (p) et le cyclisme (b) pour des épreuves de longue durée. Dans les formes de locomotion où la résistance de l'air est négligeable, comme la natation (n), la chute de vitesse coïncide avec la chute de puissance musculaire.

Le graphique a été construit pour un sujet de 70 kg, 175 cm, à une température ambiante de 20 °C et pour une puissance musculaire de 1,8 kW au niveau de la mer.

V - Les terrains en pentes

La puissance développée est dépendante
de la pente

$$P_{\text{méca}} = M g \sin(a) V_d$$

Coût énergétique (J/kg/m) de la course et de la marche à vitesse optimale en fonction de la pente du terrain

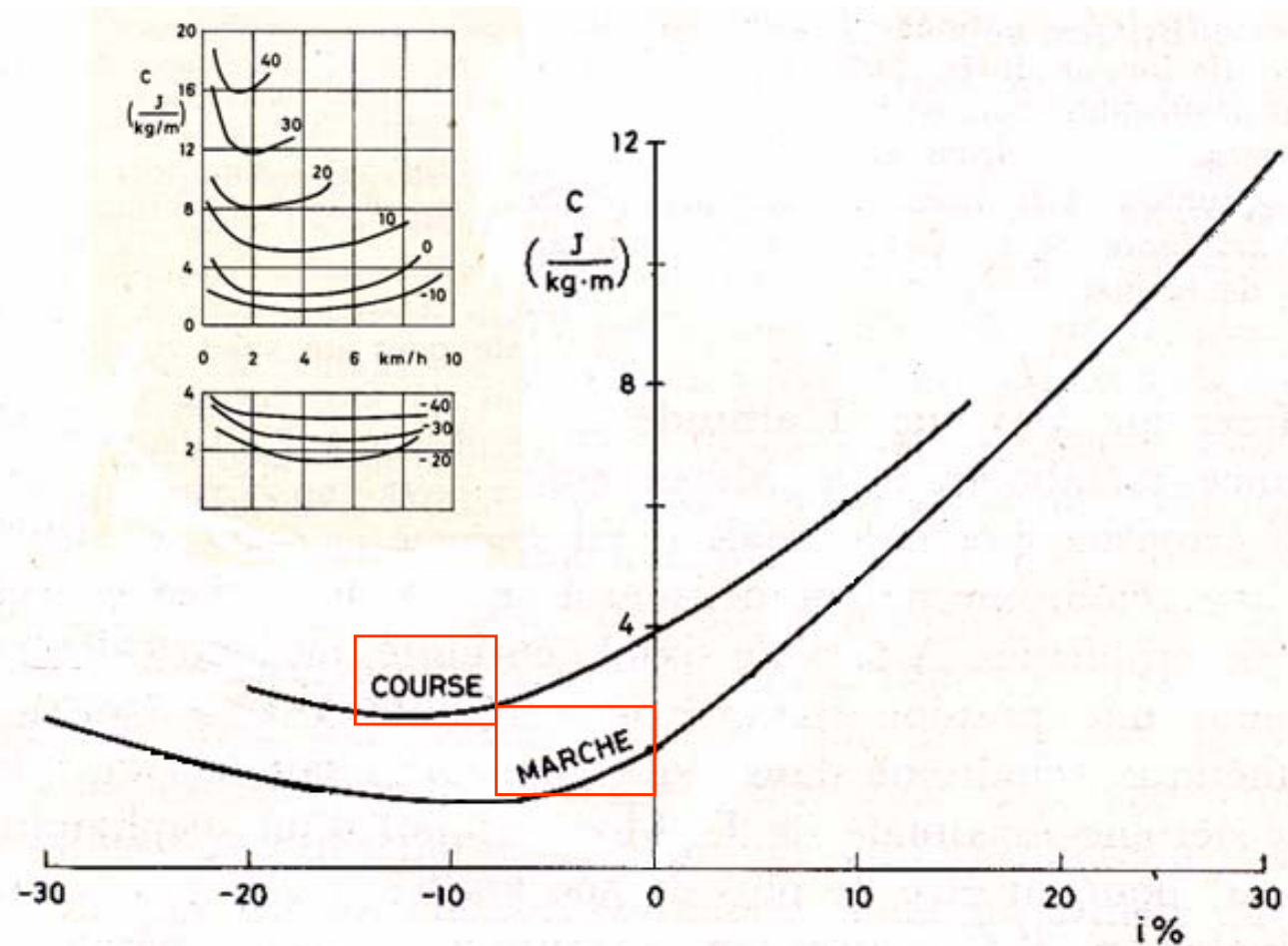


FIG. 101. — Coût énergétique ($C, J \cdot kg^{-1} \cdot m^{-1}$) de la course, et de la marche à la vitesse optimale, en fonction de la pente du terrain ($i, \%$) sur tapis roulant.

Le coût énergétique de la course est indépendant de la vitesse, tandis que celui de la marche ne l'est pas, il est indiqué en haut de la figure, en fonction de la vitesse pour différentes valeurs de la pente du terrain.

(D'après les données de Margaria, 1938, et Margaria et coll., 1963.)

V - Les dimensions corporelles du sportif

Le poids est un facteur déterminant lors de la locomotion en montée

La longueur des segments

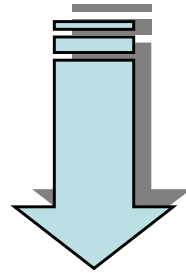
Le poids des segments

La masse du buste

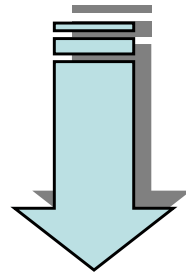
La répartition des masses entre elles

Le SCx du sportif en fonction de la discipline sportive peut avoir des effets importants sur la performance

**Les sportifs de grande taille auraient une +
petite surface corporelle / unité de poids que
les sujets de petite taille**



à une vitesse donnée, ils dépenseraient moins
d'énergie / kg contre Ra ?



Le ratio SC_x / P_{ext} ne corrobore pas cette hypothèse

VI - CE de la locomotion aquatique en natation

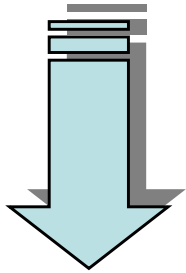
La masse affecte positivement CE en natation

CE plus favorable pour les sujets de masse importante en natation que pour les locomotions terrestres

Un % élevé de masse grasse augmente la flottabilité et réduit la traînée.

Pour un même poids, les nageurs les plus musclés et ayant un % masse grasse plus faible ont un CE plus élevé.

- Le CE du crawl augmente très rapidement avec la vitesse de nage



Viscosité de l'eau très importante

Coût énergétique du crawl en fonction de la vitesse pour des nageurs de niveaux différents

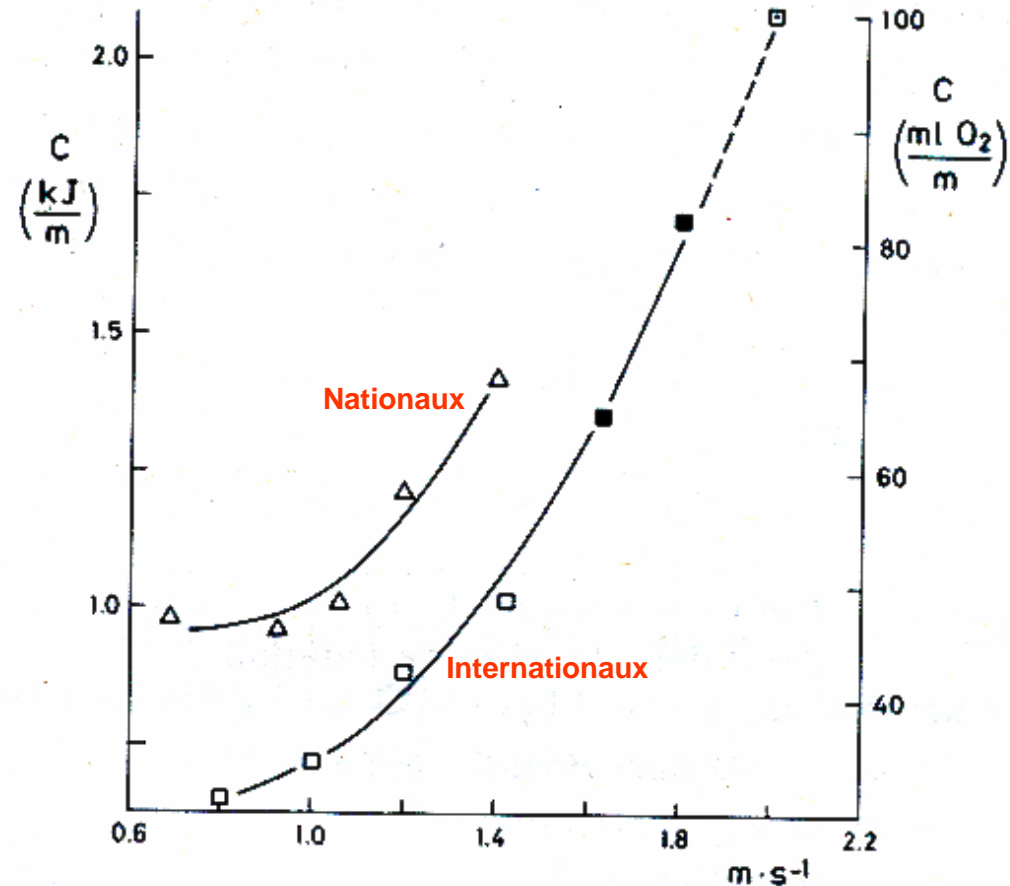


FIG. 102. — Coût énergétique de la natation (C , $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-1}$ ou $\text{ml O}_2 \cdot \text{m}^{-1}$), crawl, en fonction de la vitesse ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) pour 5 sujets de bon niveau (+) et 9 (\square) ou 3 (\blacksquare) nageurs d'élite de sexe masculin. Le point à $2,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (\boxplus) a été obtenu à partir de la quantité maximale d'énergie qu'un athlète d'élite peut dépenser en 50 s, sur 100 m de parcours, à partir des sources oxydatives, lactiques et alactiques.

(D'après Holmer, 1974 b (\square), et di Prampero et Pendergast (+, \blacksquare), données non publiées.)

Coût énergétique de différentes nages en fonction de la vitesse

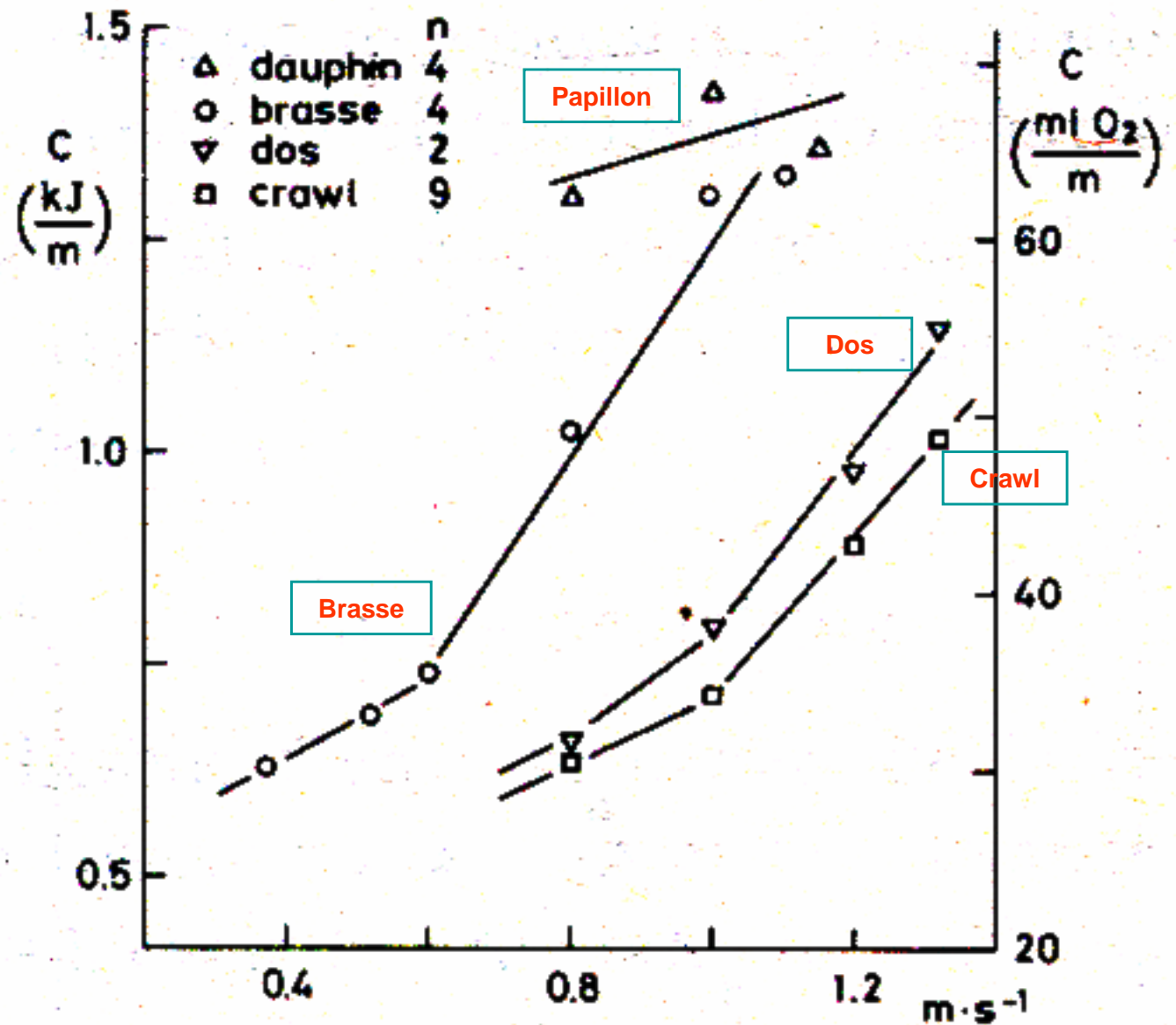


FIG. 103. — Coût énergétique (C , $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-1}$ ou $\text{ml O}_2 \cdot \text{m}^{-1}$) des différents styles de natation : crawl (\square , $n = 9$); dos (Δ , $n = 2$); brasse (\circ , $n = 4$) et dauphin (Δ , $n = 4$) (D'après Holmer, 1974 a et b)

CE en crawl entre les hommes et les femmes

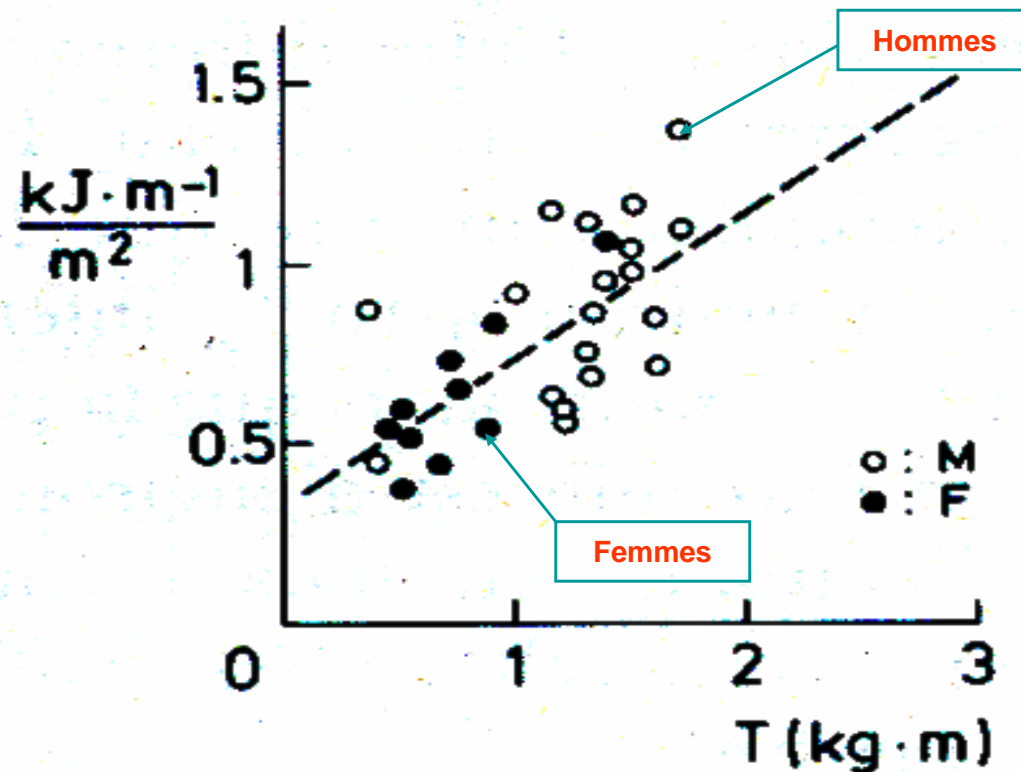
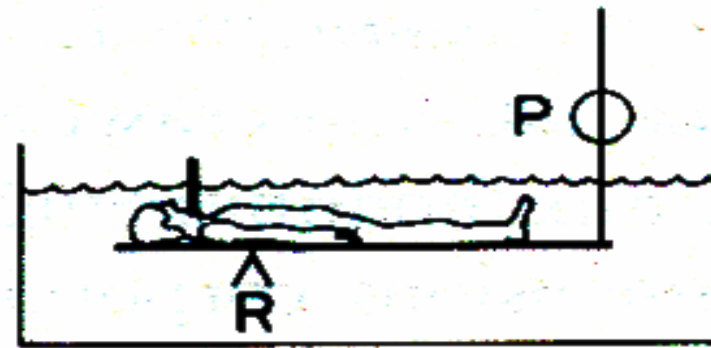


FIG. 104. — Coût énergétique de la natation, crawl, $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-1}$ et par mètre carré de surface corporelle chez des hommes (O) et des femmes (●) de niveau technique moyen, en fonction du moment de torsion (T , $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$). Ce dernier a été déterminé à partir de la force (P) mesurée au niveau des pieds d'un sujet immergé dans l'eau et couché sur une planche libre de pivoter sur l'axe R . Le produit P fois la distance R -pieds est égal au moment de torsion T .

(D'après Pendergast *et al.*, 1977.)

VII - CE de la locomotion en aviron et en kayak

CE en aviron et en kayak en fonction de la vitesse

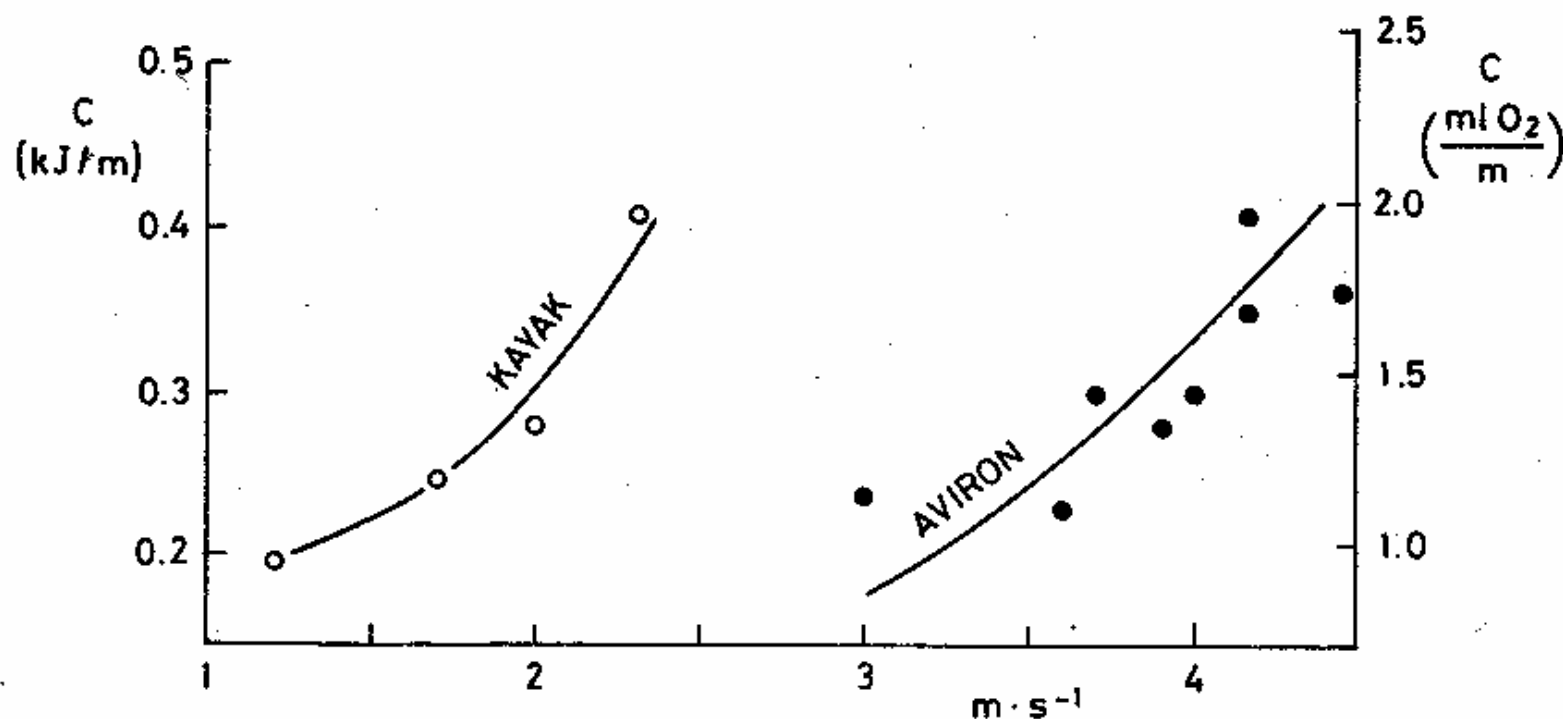


FIG. 105. — Coût énergétique (C , $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-1}$ ou $\text{ml O}_2 \cdot \text{m}^{-1}$) en fonction de la vitesse (m/s) dans le kayak

(D'après Pendergast et Cerretelli, communication personnelle, 1984)

et l'aviron pour un seul rameur — « deux avec barreur »

(D'après di Prampero et coll., 1971)

VIII - CE de la locomotion en ski de fond

**Comparaison du CE dans différentes
techniques de patinage**

(résumé de Boissière et coll.)

Principales techniques de patinage en ski :

- pas de patineur de base (2B) : 1 action motrice des MS pour 2 actions motrices des MI. Planté de bâton et pose de ski synchrones.
- pas de patineur combiné (2C) : 1 action motrice de type poussée simultanée des MS pour 2 actions motrices des MI.
- pas de patineur symétrique (1S) : 1 action motrice des MS pour chaque action des MI.
- pas de patineur sans bâton (SB) : patinage sans planté de bâton avec accompagnement d'un balancement des bras.

Tests effectués :

- piste de 300 m à 1280 m
- 4 ex. de 6 min à $V1 = 78\%$ de VMA (17.1 km/h) en 2B, 2C, 1S et SB.

Matériel :

- K4b2 (Cosmed)

Résultats

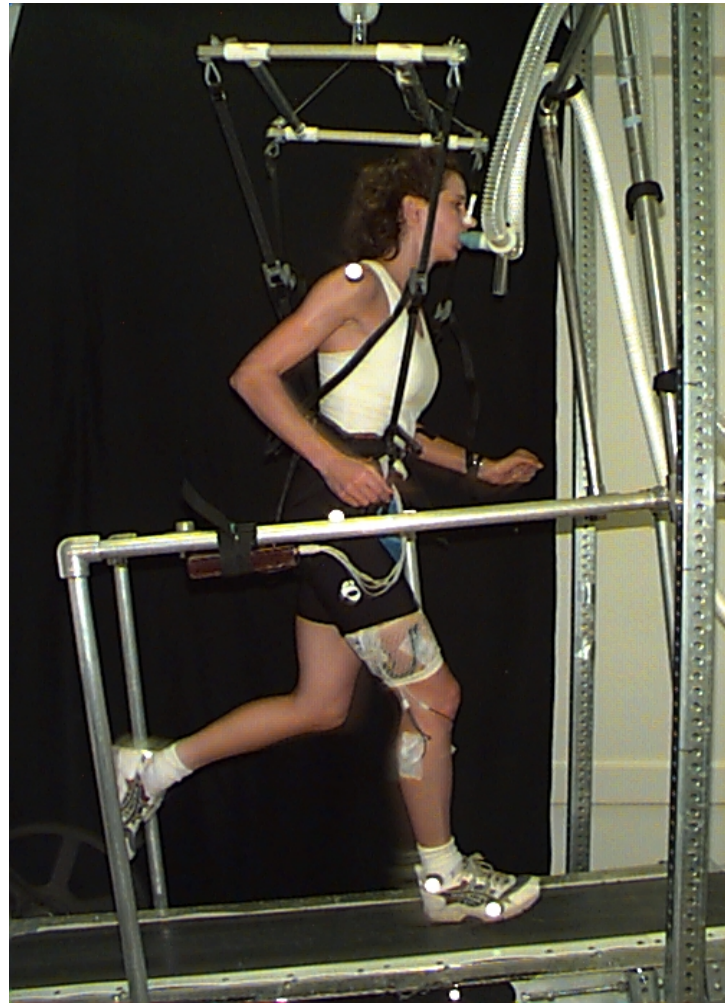
Conditions	2B	2C	1S	SB
FC (bpm)	155.9 ± 16.4 **	155.4 ± 14.6 **##	160.1 ± 17.7 #	162.3 ± 18.1
CE (mlO ₂ /kg/km)	160.5 ± 14.6 ***	163.1 ± 15.4 ***	167.7 ± 16.6 *#	175.4 ± 19.6
RPE	10.8 ± 2.2 *	10.2 ± 1.7 ***£	10.9 ± 2.2 *	13.0 ± 2.2
Fréquence (Hz)	1.27 ± 0.16 **	1.02 ± 0.12 ***###£	0.91 ± 0.08 ***###	1.14 ± 0.10
Distance cycle (m)	3.8 ± 0.5 **	4.7 ± 0.6 ***###£	5.3 ± 0.5 ***###	4.2 ± 0.4

Pour différences avec 2B : # = p < 0.05 ; ## = p < 0.01 ;

Pour différences avec SB : * = p < 0.05 ; ** = p < 0.01 ; *** = p < 0.001 ;

Pour différences avec 1S : £ = p < 0.05

Measurement of running efficiency and muscle activity (EMG) during uphill running in simulated reduced gravity.



Fred Grappe 2006