

Plan

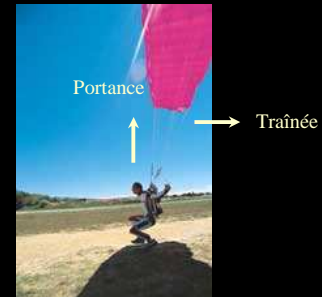
1. Introduction
2. Energie, force, travail, puissance
5. Travail cinétique
6. Travail potentiel
7. Travail interne
8. Travail élastique
9. Travail et fatigue
10. Travail contre les forces de friction
(aérodynamique, roulement...)
11. Conversion Energie chimique en mécani



Traînée et portance

La portance ne présente qu'une très faible influence dans les locomotions humaines en raison des faibles surfaces offertes et des vitesses modérées atteintes.

En revanche, la traînée ou résistance aérodynamique joue un rôle majeur pour les locomotions les plus rapides.



Résistances aérodynamiques

- 2 Types de résistances :
 - Traînée de frottement
 - Traînée de pression



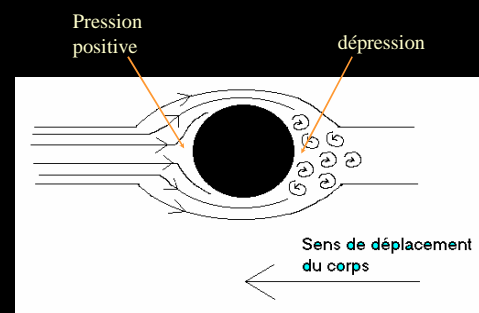
Traînée de frottement

- Les filets d'air à proximité des parois de l'objet en mouvement sont **ralentis** en raison d'un phénomène de friction.
- La traînée de frottement dépend de la **rugosité** de la paroi et représente **une faible part** dans les résistances aérodynamiques.
- Dans le cyclisme, l'utilisation de roues lenticulaires (grandes surfaces) nécessite sa prise en compte.

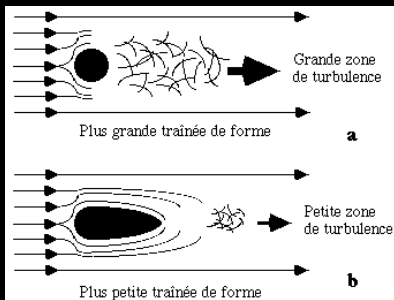
Traînée de pression

- représente l'essentiel des résistances aérodynamiques
- due à une asymétrie de pression entre avant et arrière du corps en mouvement

Traînée de pression



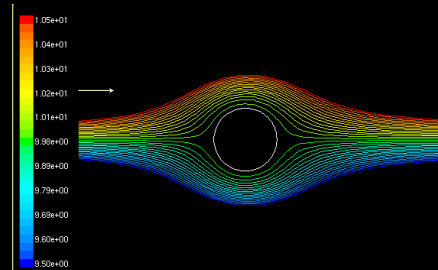
Forme de l'objet et importance de la dépression



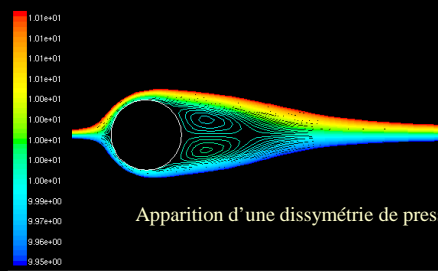
Les filets d'air suivent plus facilement le profil le point de décollement est très reculé

Fluide parfait

Dans l'espace, symétrie parfaite => absence de résistance

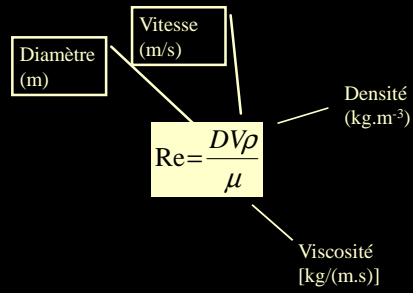


Fluide visqueux, 15 > nombre reynolds < 45



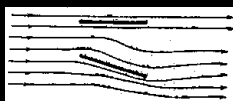
Apparition d'une dissymétrie de pression

nbre de Reynolds



2 types d'écoulement

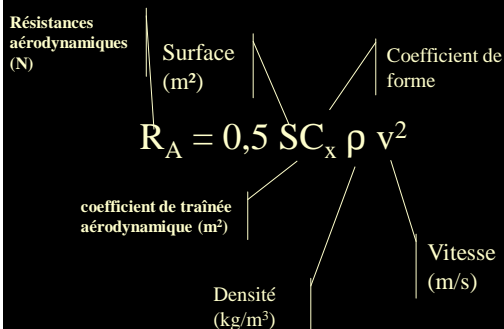
- Laminaire
Plaque dans l'axe des
Filets d'air ou inclinée
(<30°)



- Turbulent



Facteurs de RA



Résistances aérodynamiques?

Pour G. Obree lors de son record du monde de l'heure établi à 53 km sachant qu'il possédait un coefficient de de traînée aérodynamique de 0.19 m²?



Résistances aérodynamiques?

$$R_A = 0,5 \cdot S C_x \cdot \rho \cdot v^2$$

$$= 0,5 * 0,19 * 1,22 * (53/3,6)^2$$

$$= \underline{25 \text{ N}}$$



Puissance aérodynamique?

(rappel) $W' = F \cdot v$

ici $W'_{Ra} = R_a \cdot v$

$$= 25 * (53/3,6)$$

$$= \underline{370 \text{ W}}$$



Puissance consommée?

Sachant que le rendement en cyclisme est de 0,24 quelle était la puissance consommée par Obree?



Puissance consommée?

Isoler E

$$\eta = \frac{\dot{W}_{méca}}{\dot{E}}$$

$$\dot{E} = \frac{\dot{W}_{méca}}{\eta}$$



Dans nos conditions

$$\dot{E} = \frac{370}{0,24} = 1542 \text{ W}$$

VO₂ (ml/min/kg) ?

Quelle était sa consommation d'O₂ sachant qu'il possède une masse corporelle de 65 kg?



$\dot{V}O_2$ (ml/min/kg) ?

$$\begin{aligned} \dot{V}O_{2\text{exer}} &= (\dot{E} / \text{Eq}O_2) / m + \dot{V}O_{2\text{repos}} \\ (\text{ml/min/kg}) &= (\text{J/min}) / (\text{J/ml}O_2) / (\text{kg}) + (\text{ml/min/kg}) \\ &= ((1542 \cdot 60) / 21,3) / 65 + 5 \\ &= 67 + 5 \\ &= \underline{72 \text{ ml/min/kg}} \end{aligned}$$



$\dot{V}O_{2\text{max}}$ (ml/min/kg) ?

Sachant que les athlètes d'élite peuvent maintenir 90% de $\dot{V}O_{2\text{max}}$ pendant une heure, quelle était la $\dot{V}O_{2\text{max}}$ d'Obree ?



$\dot{V}O_{2\text{max}}$ (ml/min/kg) ?

$$\begin{aligned} \dot{V}O_2 &= \dot{V}O_{2\text{max}} \cdot 0,9 \\ \text{d'où : } \dot{V}O_{2\text{max}} &= \dot{V}O_2 / 0,9 \\ \text{ici} &= 72 / 0,9 \\ &= \underline{80 \text{ ml/min/kg}} \end{aligned}$$

Application pratique : V_{max} pendant 7min ~ $V \dot{V}O_{2\text{max}}$

Course de l'empire state building du 1/2/11

Paramètre	Valeur	Unité
T	00:10:10	sexe
T	610	s
	1576	marches
dénivelet	381	m
	2	
dénivelet	249	m/ft
étage	86	
	3	
Wpot	738	J/kg
Ppot	6	J/kg/s
E	26	W/kg
VO2	76,9	ml/min/kg



Facteurs des résistances aérodynamiques

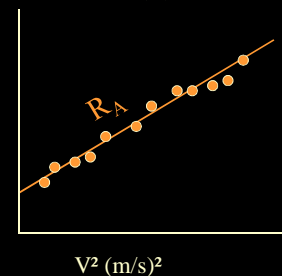
- Vitesse
- Surface frontale
 - Définition
 - Exemple sur l'homme
- Coefficient de forme
 - Formes simples et cas des locomotions
 - Position (angle par rapport aux filets d'air)
 - nbre de Reynolds

$$R_A = 0,5 S C_x \rho v^2$$



R_A augmente avec le carré de la vitesse

Résistances Totales (N)



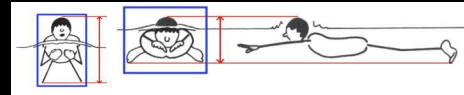
Facteurs des résistances aérodynamiques

- Vitesse
- Surface frontale
 - Définition
 - Exemple sur l'homme
- Coefficient de forme
 - Formes simples et cas des locomotions
 - Position (angle par rapport aux filets d'air)
 - nbre de Reynolds

$$R_A = 0,5 S C_x \rho v^2$$

Surface frontale (maître couple)

$$R_A = 0,5 S C_x \rho v^2$$

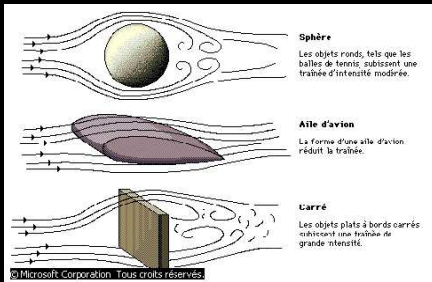


<http://www.steps.uhp-nancy.fr>

La résistance est proportionnelle à la surface :

Coefficient de forme

$$R_A = 0,5 S C_x \rho v^2$$



C_x

0.47

0.04

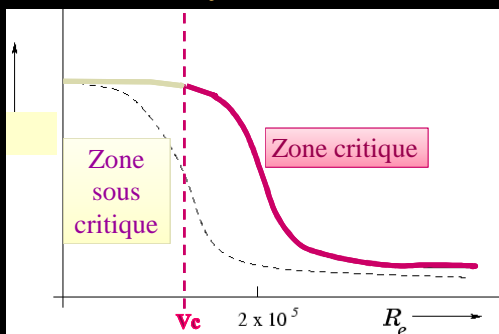
1.8

Shape	Drag Coefficient
Sphere	0.47
Half-sphere	0.42
Cone	0.50
Cube	1.05
Angled Cube	0.80
Long Cylinder	0.82
Short Cylinder	1.15
Streamlined Body	0.04
Streamlined Half-body	0.09

C_x

Measured Drag Coefficients

C_x : Influence de la vitesse



Nombre de Reynolds ~ vitesse



$$S C_x \sim 0.35 m^2$$

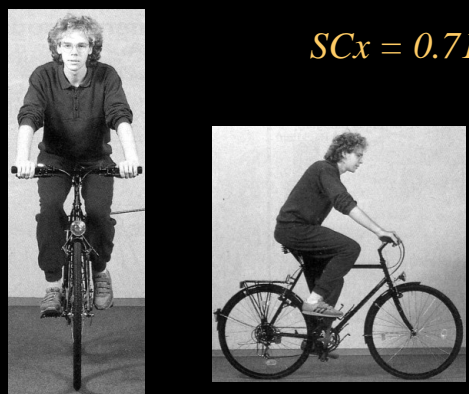
Très difficile de distinguer S de C_x . En pratique on considère globalement $S C_x$, le coefficient de traînée aérodynamique





$SC_x \sim 0.30 \text{ m}^2$

$SC_x \sim 0.25 \text{ m}^2$



$SC_x = 0.71 \text{ m}^2$

Fin ici

Facteurs de RA suite

- Densité du fluide
 - locomotion terrestre vs. Aquatique
- altitude



Locomotion terrestre vs. Aquatique


A 3.6 km/h (1 m/s) quelles sont respectivement les résistances aérodynamiques dans l'air et dans l'eau?



Locomotion terrestre

$$R_A = 0,5 \cdot SC_x \cdot \rho \cdot v^2$$


$$= 0,5 \cdot 0,3 \cdot 1,22 \cdot (1)^2$$

$$= \underline{0.18 \text{ N}} \quad \text{très faible!!}$$


Locomotion aquatique

$$R_A = 0.5 \cdot SC_x \cdot \rho \cdot v^2$$

$$= 0.5 \cdot 0.2 \cdot 1000 \cdot (1)^2$$

$$= \underline{100 \text{ N}}$$


Résistance 600 fois supérieure !

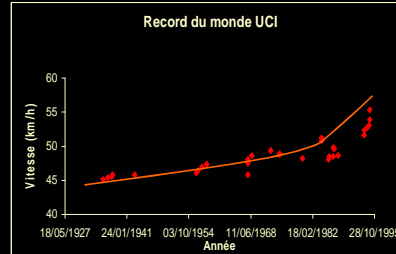


Optimisation des résistances aérodynamiques

- évolution des performances
- optimisation de la position
 - du buste
 - des membres supérieurs
 - des membres inférieurs
- optimisation du matériel
 - profile des tubes
 - carénage
 - position des accessoires

$$R_A = 0,5 S C_x \rho v^2$$

Evolution du record de l'heure



A partir des années 1980, grand intérêt pour l'aérodynamisme



Grande augmentation de performance

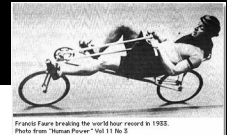
19/07/2005 Ondřej Sosenka République tchèque
49.700 km (Moscou)



<http://imgs.idnes.cz/sporty>

Date	Cycliste	Piste
31/10/1936	Giuseppe Olmo	Milano
14/10/1936	Maurice Richard	Milano
29/09/1937	Franz Sittler	Milano
24/09/1937	Jacques Anquetil	Besançon
01/11/1937	Maurice Archambaud	Milano
07/11/1942	Fausto Coppi	Milano (Vigorelli)
29/06/1956	Jacques Anquetil	Milano (Vigorelli)
19/09/1959	Ezio Saldini (It)	Milano (Vigorelli)
18/09/1967	Roger Rivard	Milano (Vigorelli)
23/09/1959	Roger Rivard	Milano (Vigorelli)
27/09/1967	Jacques Anquetil	Milano (Vigorelli)
30/10/1967	Ferdinand Bracke	Roma (Olimpico)
09/09/1985	Hans Henrik Oersted	Bassano da Grappa
01/11/1979	Hans Henrik Oersted	Mexico City
28/10/1986	Vladimir Kabanov (It)	Moscou
28/09/1986	Francoisco Moser	Milano (Vigorelli)
10/10/1987	Francoisco Moser	Milano (Vigorelli)
06/10/1988	Ole Ritter	(Olimpico)
05/11/1974	Ole Ritter	(Olimpico)
10/11/1974	Ole Ritter	(Olimpico)
25/10/1972	Edw. Meekix	(Olimpico)
27/10/2000	Chris Boardman	Manchester
27/10/1986	Vladimir Kabanov (It)	Moscou
09/10/1986	Francoisco Moser	Milano (Vigorelli)
19/01/1984	Francoisco Moser	Centre
23/01/1984	Francoisco Moser	Centre
17/07/1993	Graeme Obree (It)	Hâmar
23/07/1993	Chris Boardman (It)	Bordeaux

Francis Faure couvre 45.055 km dans l'heure à Paris vélodrome en 1933



Francis Faure breaking the world hour record in 1933. Photo from "Human Power" vol 11, fig 2. www.bikefix.co.uk/forbidden.html



www.velorizonta.com

- Record de l'heure : 84, 215 km (par Sam Whittingham en 2004).



- Record féminin de l'heure : 73, 411 km (par Rosmarie Bühler en 2004).



Femme/homme



- 26/10/1996 Jeannie Longo France
48,159 km (Mexico)
- 7/9/1996 Chris Boardman
Manchester 56,375 km (Moscou)

Soit une différence de 14%

Evolution du cyclisme



Quel est le bénéfice sur le coût énergétique et d'où provient-il ?

Evolution du cyclisme

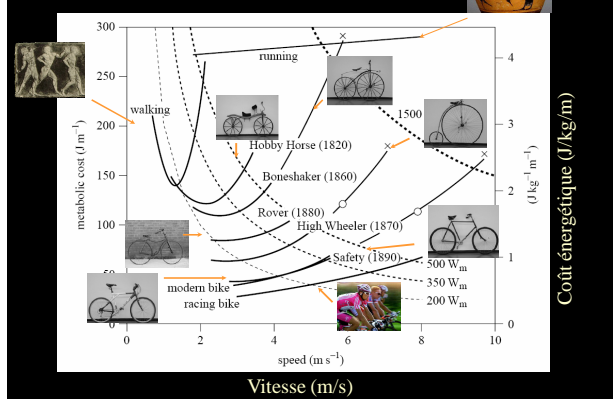
52 A. E. Minetti and others *Energetics and biomechanics of cycling history*

Table 1. The bicycles, technical data

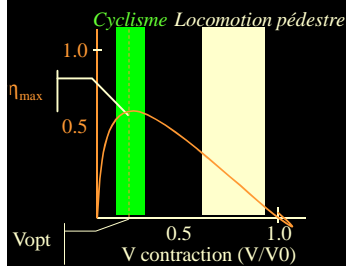
(Abbreviations: DFS, diamond-frame safety; PTS, pneumatic-tyre safety.)

	Hobby Horse	Boneshaker	High Wheeler	Rover (DFS)	Safety (PTS)	modern bicycle
abbreviation	HH	BS	HW	RO	SA	MB
year ^b	1820s	1860s	1870s	1880s	1890s	1980s
mass (kg)	23.7	24.5	15	20	16.5	12.1
handlebar height (m)	1.26	1.22	1.40	1.20	1.30	0.95
saddle height (m)	0.86	0.99	1.31	0.95	1.01	0.90
front wheel diameter (m)	0.725	0.89	1.27	0.75	0.71	0.64
rear wheel diameter (m)	0.725	0.74	0.44	0.75	0.71	0.64
distance travelled per pedal revolution (m)	—	2.30	3.99	4.45	5.50	5.02 ^c
tyre thickness (mm)	20	20	20	20	40	45
rim or spokes	wood	wood	metal	metal	metal	metal
tyres	metal	metal	solid rubber	solid rubber	pneumatic	pneumatic
rakes	no	rear	front	front	front	front or rear
bike = subject frontal area (m ²)	0.46 ± 0.02	0.44 ± 0.02	0.55 ± 0.01	0.48 ± 0.01	0.49 ± 0.03	0.46 ± 0.01
rolling resistance, C _r	0.0268 ± 0.0018	0.0284 ± 0.0026	0.0158 ± 0.0020	0.0200 ± 0.0029	0.0085 ± 0.0037	0.0084 ± 0.0037
air density (ρ kg m ⁻³)	1.195	1.192	1.166	1.200	1.195	1.201

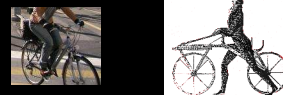
Différence de coût énergétique



Rendement musculaire



L'évolution des performances est due principalement à un travail musculaire qui s'effectue à une vitesse proche de celle optimale



Optimisation des résistances aérodynamiques

- évolution du record de l'heure
- optimisation de la position
 - du buste
 - des membres supérieurs
 - des membres inférieurs
- optimisation du matériel
 - profile des tubes
 - carénage
 - position des accessoires

$$R_A = 0,5 SC_x \rho v^2$$

optimisation de la position



- du buste
- des membres supérieurs



New Zealand, Sarah Ulmer, record du monde du 3000 m, mai 2004



USA, Irin Mirabella, JO Sydney 2004

Optimisation de la position des membres inférieurs

250,7 km/h!



Écarter les membres inférieurs :

- Augmenter la stabilité sur les carres internes
- Améliorer l'écoulement de l'air entre les membres inférieurs

<http://www.ki-france.com/images/photos/goisch68.jpg>

Optimisation des résistances aérodynamiques



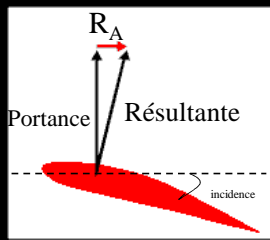
- évolution des performances
- optimisation de la position
 - du buste
 - des membres supérieurs
 - des membres inférieurs
- optimisation du matériel
 - profile des tubes et incidence
 - carénage
 - position des accessoires

$$R_A = 0,5 S C_x \rho v^2$$

Laminaire

Plaque dans l'axe des Filets d'air ou inclinée (<30°)

Incidence



Plus l'incidence est importante plus R_A est grand



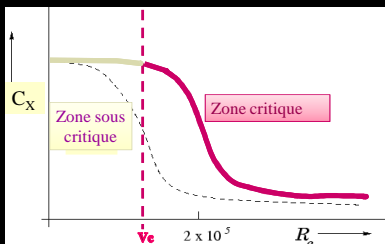
Eviter les tubes et segments verticaux dans le matériel sportif



Suite optimisation R_a

- De la tenue vestimentaire
- Artifices aérodynamiques (fin ici groupe 2)
 - Ajout de pression à l'arrière des véhicules
 - Modification du profil avec rebourrages
 - Surfaces rugueuses
- Montée en altitude
 - Deux effets antagonistes
 - Effets en cyclisme
 - Effets en athlétisme
- Drafting
- Optimisation des résistances hydrodynamiques

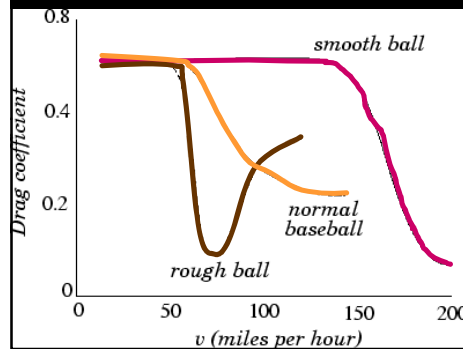
État de surface et coefficient de forme



L'utilisation de surface rugueuse permet d'atteindre la zone critique pour des vitesses inférieures

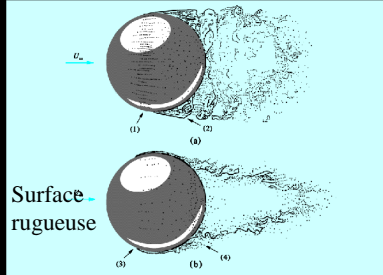
- ↓ C_x
- ↓ R_a et ↓ C
- ↑ performance

C_x pour différents types de balle



La balle rugueuse va plus vite que la balle parfaitement lisse car la traînée de pression est diminuée (meilleur écoulement de l'air dans le sillage).

Recul du point de décollement



Recul du point de décollement

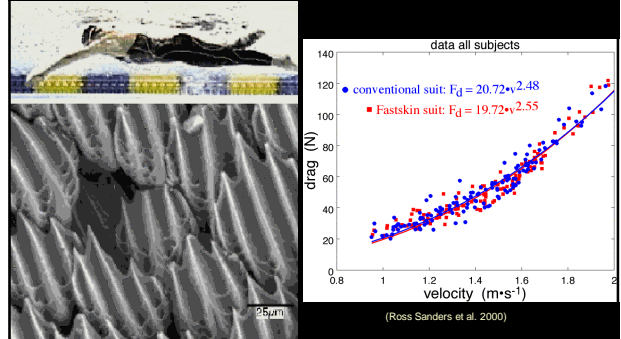


Diminution des turbulences



Plus grande vitesse

Application en natation



Suite optimisation R_a

- De la tenue vestimentaire
- Artifices aérodynamiques
 - Ajout de pression à l'arrière des véhicules
 - Modification du profil avec rembourrages
 - Surfaces rugueuses
- Montée en altitude
 - Deux effets antagonistes
 - Effets en cyclisme
 - Effets en athlétisme
- Drafting
- Optimisation des résistances hydrodynamiques

Effets négatifs de l'altitude

La pression barométrique diminue avec l'altitude

Or la fraction de l' O_2 est tjrs de 21%

$V'O_{2max}$ diminue

Effets antagonistes

$R_A = 0,5 S C_x \rho v^2$

↘ Pression barométrique

↘ Pression partielle en O_2

↘ VO_{2max}

↗ ?

L'Everest en 8h10!

- Des aptitudes énergétiques similaires à ceux de l'élite mondiale en athlétisme!

Chute de VO_{2max} avec l'altitude

Pemba Dorji

Altitude suite

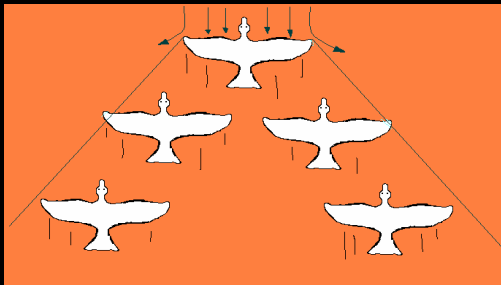
- Effets en cyclisme
à 3300 m chute de VO_{2max} de 20%
largement compensée par la diminution de R_a
- Effets en athlétisme
 - effet positif dans le sprint (métabolisme anaérobie peu affecté et R_a diminuées)
 - effet négatif à partir du 400 m



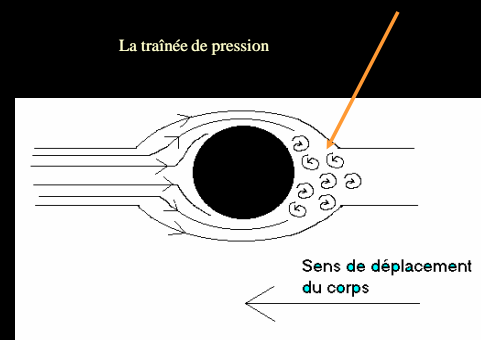
Suite optimisation R_a

- De la tenue vestimentaire
- Artifices aérodynamiques
 - Ajout de pression à l'arrière des véhicules
 - Modification du profil avec rembourrages
 - Surfaces rugueuses
- Montée en altitude
 - Deux effets antagonistes
 - Effets en cyclisme
 - Effets en athlétisme
- Drafting
- Optimisation des résistances hydrodynamiques

Drafting



Drafting



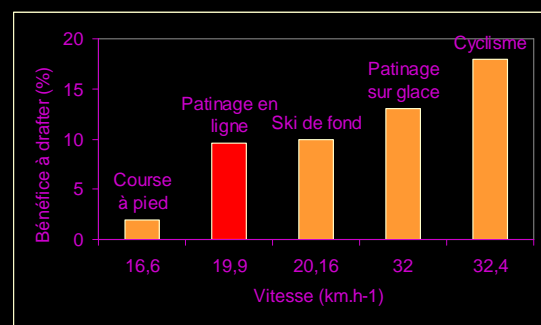
Bénéfice dans le cyclisme



Bénéfice de 30 à 50%



Bénéfice sur le coût énergétique



Suite optimisation des résistances aérodynamiques

- Drafting

- importance des bénéfiques :

- 30-50% en cyclisme
- 20-25% en natation
- 15-20% en patin
- 5-10% en ski de fond
- <3% en course à pied



- vitesse de déplacement
- distance par rapport au lièvre
- place dans le peloton
- facteurs techniques



Facteurs techniques

- Cas de la natation

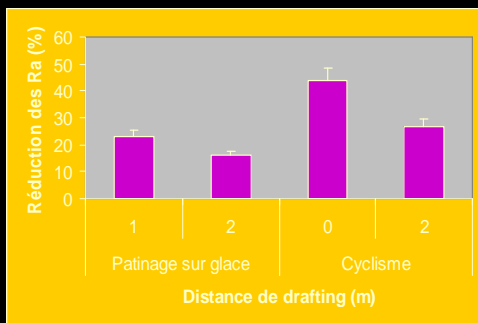
- bénéfice plus important derrière un nageur de « bras »
- aptitude spécifique à drafter doit être développée

- Cas du ski de fond et patinage de vitesse

- encombrement du matériel
- niveau d'habileté technique conditionne la distance



Effet distance



Effet distance

Au plus près (80 ± 13 cm)



Distance les bras tendus (127 ± 24 cm)



Suite optimisation Ra

- De la tenue vestimentaire
- Artifices aérodynamiques
 - Ajout de pression à l'arrière des véhicules
 - Modification du profil avec rembourrages
 - Surfaces rugueuses
- Montée en altitude
 - Deux effets antagonistes
 - Effets en cyclisme
 - Effets en athlétisme
- Drafting
- Effet Magnus



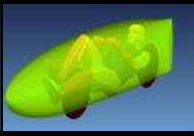
Effet Magnus

tournoi de France en 1997, les équipes de France et du Brésil s'affrontent au stade de Gerland à Lyon.

La rotation de la balle permet une trajectoire banane en raison des différences de pression de part et d'autre de la balle.



Wikipedia



Synthèse Résistances aérodynamiques

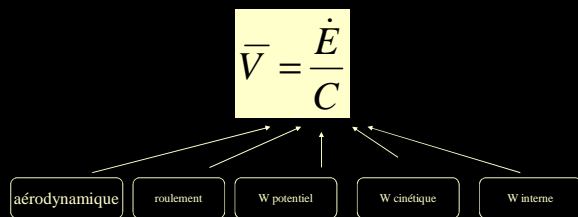
- Les locomotions qui permettent d'atteindre des vitesses élevées sont associées à de fortes résistances aérodynamiques. Le SCx représente alors un facteur majeur de la performance. (ski alpin SCx/m, cyclisme patinage ($VO_{2max} \cdot f/SCx$),)
- En course à pied pour des vitesses de sprint, R_A ne peut être négligé

Plan

1. Introduction
2. Conversion Energie chimique en mécanique
3. Energie, force, travail, puissance mécanique et consommée
4. Travail contre les forces de friction (aérodynamique, roulement...)
5. Travail potentiel
6. Travail cinétique
7. Travail interne
8. Travail élastique
9. Travail et fatigue



Vue Synthétique

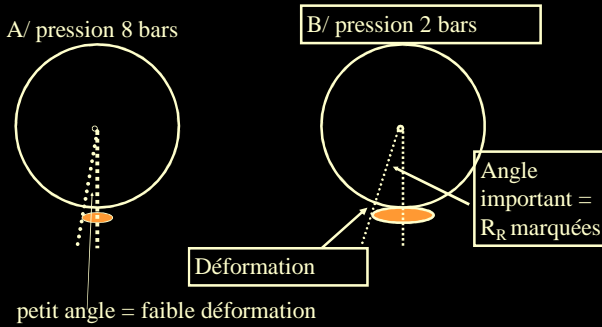


Résistances de friction

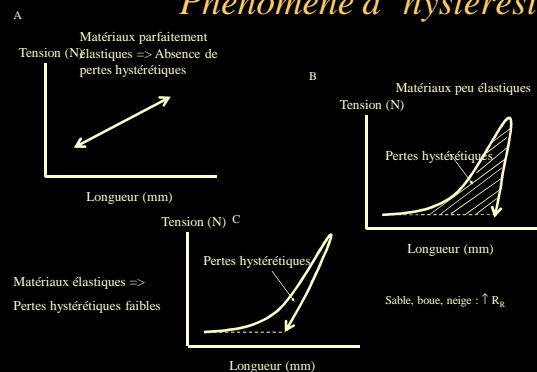
- Origine dans le cas du cyclisme :
 - friction entre les molécules qui constituent le pneumatique
 - friction dans les roulements à billes et dans la chaîne
- Importance de l'ellipse de contact du pneumatique au sol



Ellipse de contact et friction



Phénomène d'hystérésis



Caractéristiques essentielles des résistances de roulement

- dépendent de la force verticale exercée sur le pneu (m g)
- R_R indépendant de la vitesse
- caractéristiques générales du pneumatique résumées par le coefficient de roulement (C_R)

$$R_R = C_R m g$$

N kg m/s²

R_R ?

Un cycliste de 90 kg équipé d'un vélo de 10 kg se déplace à une vitesse de 50 km/h quelles sont les résistances de roulement sachant qu'il possède des boyaux gonflés à 10 bars ($C_R = 0,004$) ?



$$R_R = C_R m g$$

(N) (kg) (m/s²)

$$= 0,004 * (90 + 10) * 10 = 4 \text{ N}$$

Facteurs des résistances de roulement

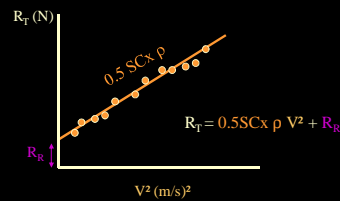
- Vitesse
- Force verticale
- Pression de gonflage
- Diamètres des roues
- Section du pneumatique
- Masse du pneumatique
- Structure du pneumatique
- Nature du revêtement



$$R_R = C_R m g$$

Vitesse

1/ Pour les locomotions humaine les RR sont indépendantes de V



2/ A lites vitesse, RR devient partiellement dépendantes de V

Facteurs des résistances de roulement

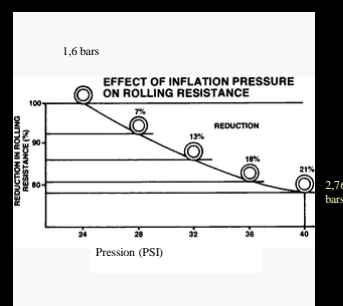
- Vitesse
- Force verticale
- Pression de gonflage
- Diamètres des roues
- Section du pneumatique
- Masse du pneumatique
- Structure du pneumatique
- Nature du revêtement



$$R_R = C_R m g$$

$$= C_R F_v$$

Pression des pneumatique



$$P = F V$$

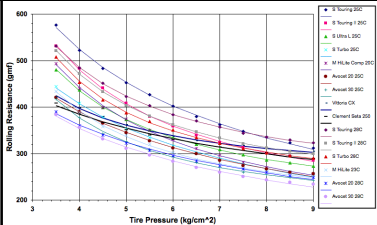
$$P_{rr} = R_r V$$

21% de gains sur les RR

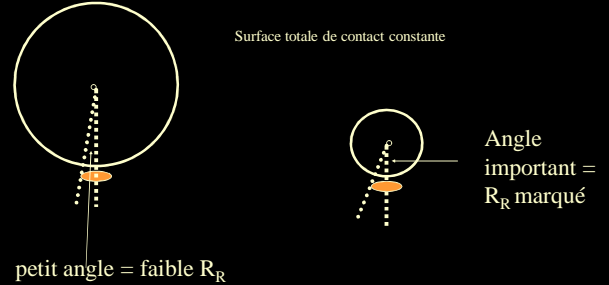


21% de gains sur C et la perf

Au dessous de 6 bars, l'effet de la pression de gonflage est désastreux



Diamètre des roues



Facteurs des résistances de roulement

- Vitesse
- Force verticale
- Pression de gonflage
- Diamètres des roues
- Section du pneumatique
- Masse du pneumatique
- Structure du pneumatique
- Nature du revêtement

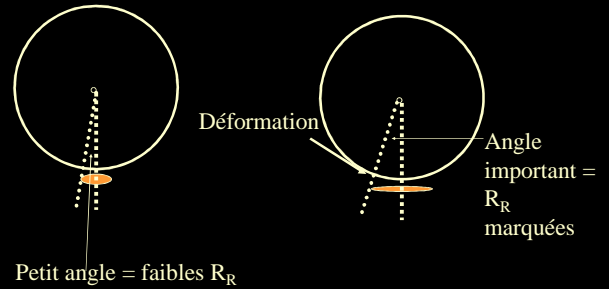


Surface totale de contact constante

Section du pneu

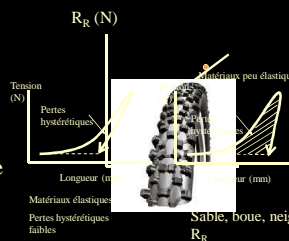
Section optimale

Section trop fine



Facteurs des résistances de roulement

- Force verticale
- Pression de gonflage
- Diamètres des roues
- Section du pneumatique
- Masse du pneumatique
- Structure du pneumatique
- Nature du sol
- Température




Effet de la montée en température

Label Ski Model	Cut at 8.5 or 7 bar (-123 or -101 psi)	Cut at 7.5 or 6 bar (-108 or -87 psi)	Rolling Performance at 8.5 or 7 bar	Rolling Performance at 7.5 or 6 bar	Load Wash	Actual Width	Height	Weight	Cuff s	Inner Tube	Max Pressure	Puncture Resista	Roundness
http://www.rouesartisanales.com													
Veloflex Carbon	0.0049	0.0050	34.05 Watt	34.74 Watt	22 mm	21.9 mm	20.8 mm	288 g	Cotton Polyester	Latex	8-9 bar / 116-131 psi	Low	Very Good
Summital 8 Route du Nord *	0.0050	0.0053	34.74 Watt	36.83 Watt	24 mm	23.7 mm	22.2 mm	285 g	Cotton Polyester	Latex	7-8 bar / 101-116 psi	Low	Okay
Summital 8 Platinum	0.0053	0.0056	36.83 Watt	38.91 Watt	21.5 mm	21.5 mm	20.7 mm	286 g	Cotton Polyester	Latex	8-9 bar / 116-131 psi	Okay	Okay
Wolow Corsa Evo CX	0.0054	0.0055	37.52 Watt	38.22 Watt	21 mm	21.1 mm	19.6 mm	271 g	Cotton Polyester	Latex	8-14 bar / 116-203 psi	Okay	Okay
Wolow Corsa Evo XS	0.0057	0.0059	39.61 Watt	41.00 Watt	21 mm	21.2 mm	20.0 mm	274 g	Cotton Polyester	Latex	8-14 bar / 116-203 psi	Low	Okay

Autres locomotions appareillées


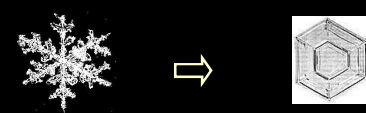
3 grands types d'interface entre le ski ou le patin et le sol :

1/ solide contre solide => friction élevée => faible glisse



2/ solide contre solide + eau => lubrification => glisse optimale

Formation puis métamorphose

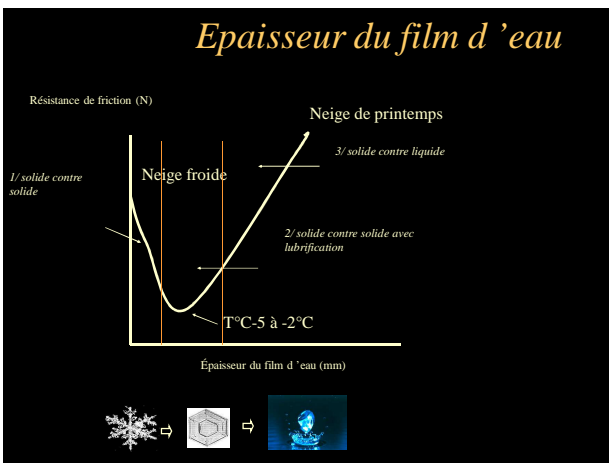



3/ interface solide contre liquide => faible glisse

Tension de capillarité

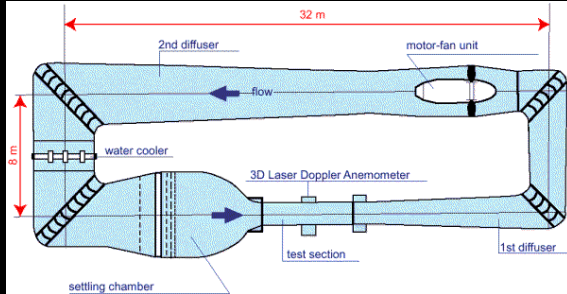


Limiter le phénomène :
Rainerer la semelle du ski

- ## Méthodes de mesure des résistances
- Soufflerie
 - Dynamométrie
 - Traction
 - En locomotion réelle
 - Décélération

Soufflerie

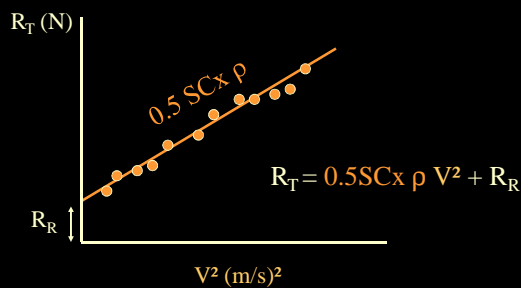


Avantage / inconvénient

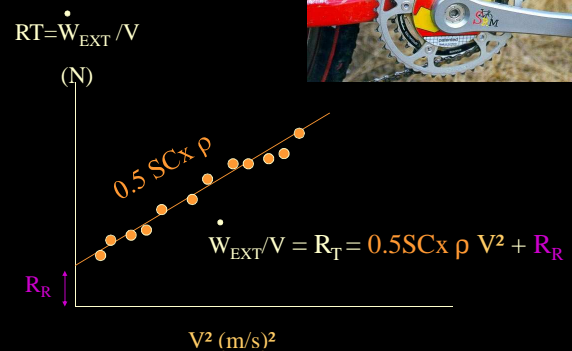
- Conditions standardisées
- Grande précision et reproductibilité
- Interaction sol- véhicule
- Mesure statique (pas de traînée de ventilation ni de mouvement de pédalage)



Méthode par traction



Méthode en situation réelle



Sur le terrain

- (+) en condition spécifique
- (-) dépendante des conditions météo donc peu précise en plein air



Méthode de décélération

Principe :

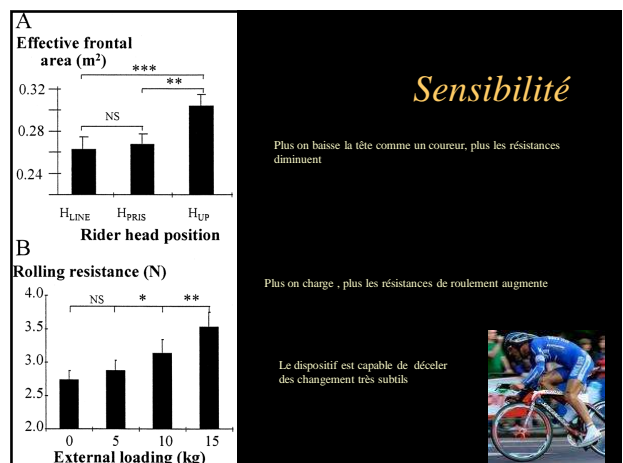
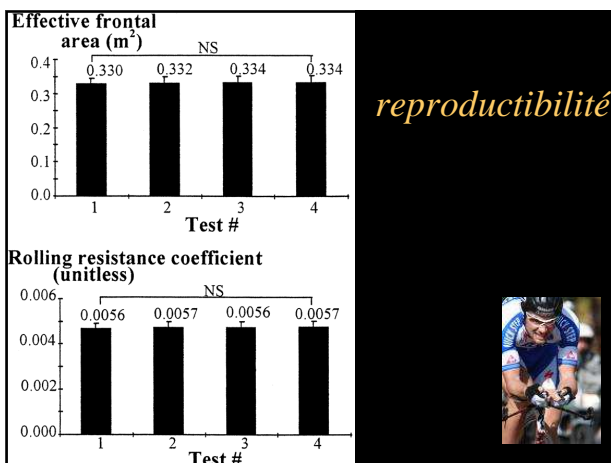
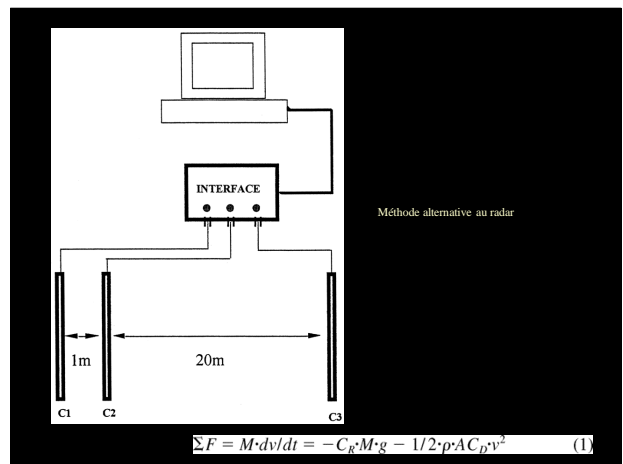
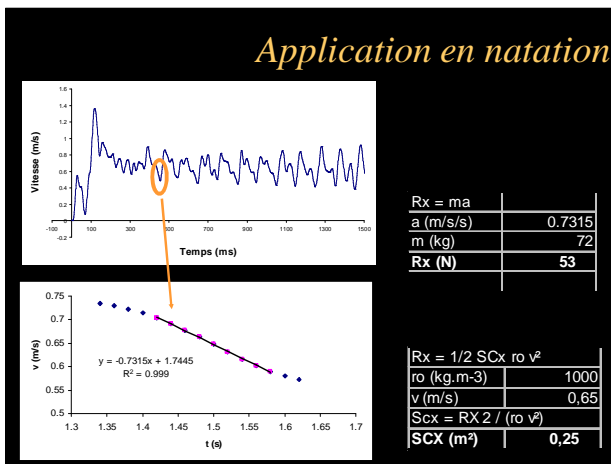
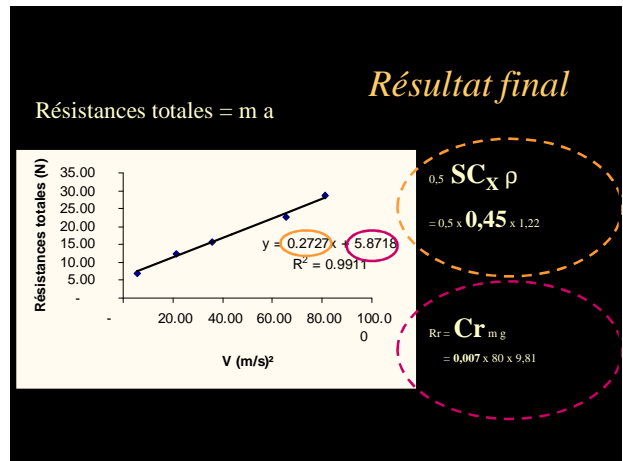
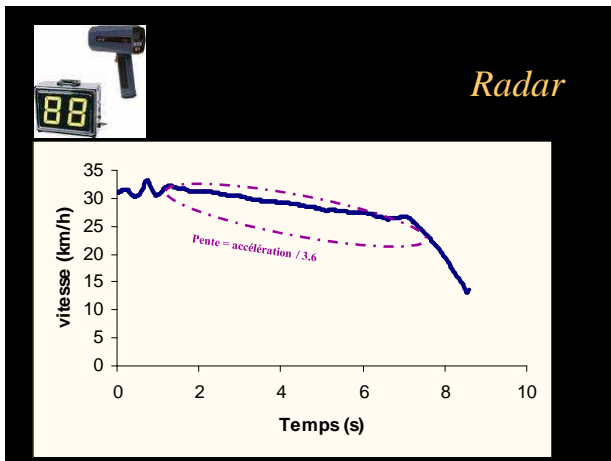
$$\sum F = ma$$

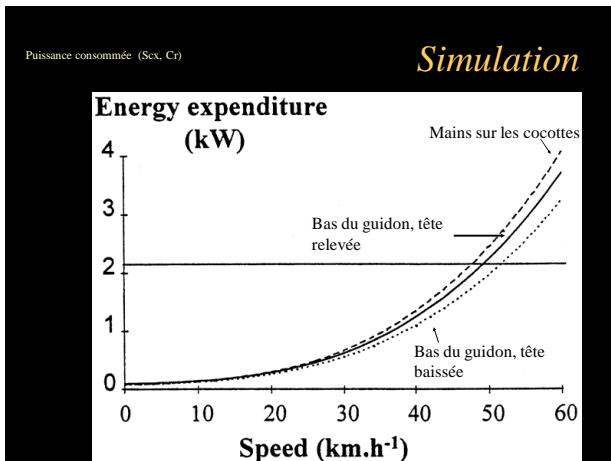
$$R_A + R_R = m a$$

$$R_A + R_R = m \Delta v / \Delta T$$

=> il suffit de mesurer la vitesse en fonction du temps







- ### Décélération
-
- Méthode basée sur les équations de la dynamique à la fois :
 1. Rapide à mettre en œuvre et
 2. Précise
 - Méthode qui permet de déterminer :
 1. Les résistances aérodynamiques et de roulement
 2. La puissance mécanique en fonction de v
 3. La puissance explosive ($P_{\text{explo}} = m a v$)

Mémento

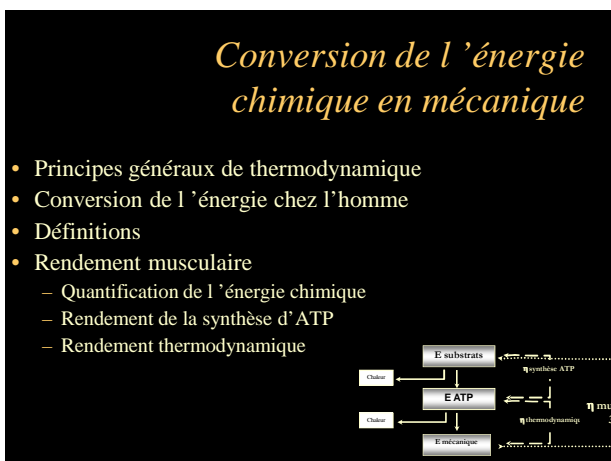
$$\bar{v} = \frac{\dot{E}}{C} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{E_{\text{méca}}}{E_{\text{substrat}}} \quad (2)$$

$$R_A = 0,5 S C_x \rho v^2 \quad (3)$$

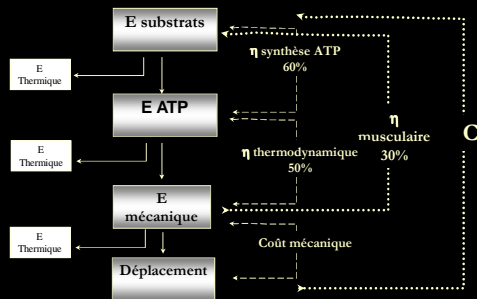
$$R_R = C_R m g \quad (4)$$

- ### Plan
- Introduction
 - Conversion Energie chimique en mécanique et définitions
 - Travail contre les forces de friction
 - Travail potentiel
 - Travail cinétique
 - Conservation d'énergie
 - Travail et fatigue
-



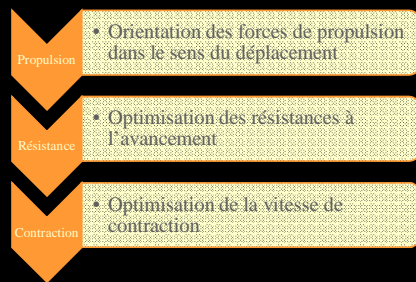
- ### Principes de thermodynamique
-
- Energie chimique
 - Energie mécanique
 - Energie thermique
 - Etc.
- Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme
 - Transformation d'un type d'énergie en un autre s'accompagne par la production d'énergie thermique

Conversion d'énergie chez l'homme

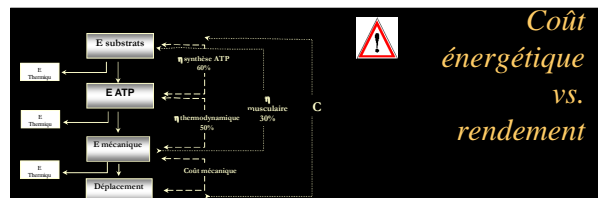


Quiz

- D'où vient l'énergie utilisée pour la locomotion?
- Avec quelle efficacité l'énergie contenue dans les sucres et les graisses est-elle convertie en énergie mécanique?

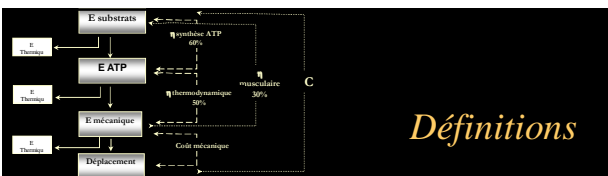


Coût mécanique *Facteur essentiel du coût énergétique et de la performance*



Coût énergétique assimilable à une économie de déplacement

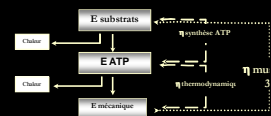
Le rendement représente l'efficacité d'un système à convertir un type d'énergie en un autre.



- Coût énergétique = $\frac{E}{V}$
- Rendement musculaire = $\frac{E_{méca}}{E_{substrat}}$
- Rendement synthèse d'ATP = $E_{ATP}/E_{substrat}$
- Rendement thermodynamique = $E_{méca}/E_{ATP}$

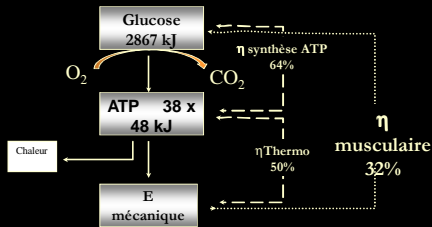
Conversion de l'énergie chimique en mécanique

- principes généraux de thermodynamique
- conversion de l'énergie chez l'homme
- définitions
- rendement musculaire
 - Quantification de l'énergie chimique
 - Rendement de la synthèse d'ATP
 - Rendement thermodynamique



Rendement musculaire

En condition aérobie et en oxydant des glucides :



Quantification de l'énergie chimique

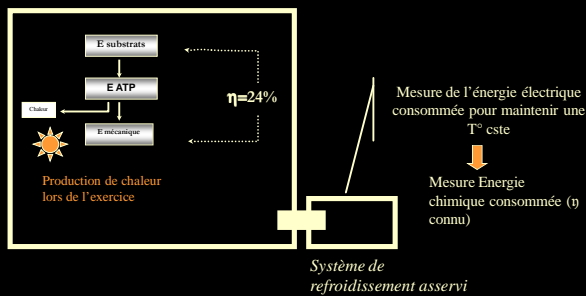
Energie fournie par les substrats

- En condition aérobie
 - Méthode calorimétrique
 - Méthode de thermochimie respiratoire
- En condition anaérobie
 - Méthode directe
 - Méthode du déficit cumulé en O₂
 - Méthode de Margaria
 - Méthode électro myographique



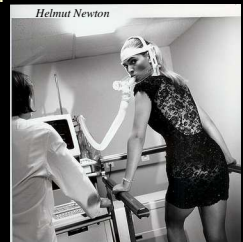
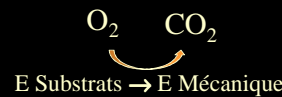
Chambre calorimétrique

Pièce étanche



Méthode quantification de la dépense d'énergie aérobie

La mesure de l'énergie libérée lors de la dégradation des substrats peut-être réalisée avec précision en l'absence d'oxydation de protéine et dans des conditions strictement aérobies.



Equivalent énergétique du mlO₂ (EqO₂)

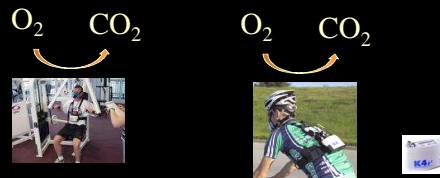
(i) Glucide

1ml O₂ → EqO₂ glucide = 21,3 J . mlO₂⁻¹
21,3J consommés → E Mécanique

(ii) Lipide

1ml O₂ → EqO₂ lipide = 19,6 J . mlO₂⁻¹
19,6J consommés → E Mécanique

Systèmes portables



Mesure de la concentration d'O₂ et de CO₂ dans les gaz expiré et évaluation du débit ventilatoire grâce à une turbine



VO_{2net} ?

- Un cycliste se déplaçant à 40 km/h consomme 55 mlO₂/kg/min. Quelle est sa consommation nette d'O₂ pour se déplacer?

$$V'O_{2net} = 55 - 5 = 50 \text{ mlO}_2/\text{min}/\text{kg}$$

Puissance consommée pour se déplacer (\dot{E}) ?

$$\begin{aligned} \dot{E} \text{ (J/min/kg)} &= E_{O_2} VO_{2net} \\ &= 21.3 \times 50 = 1065 \text{ J/min/kg} \\ \dot{E} \text{ (J/s/kg)} &= 1065 / 60 = \underline{17.8 \text{ W/kg}} \end{aligned}$$



Rendement musculaire ?

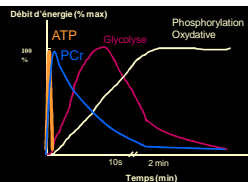
- La puissance mécanique développée au niveau de la roue est de 300 W ou 4,3 W/kg (m=70 kg). Quel est le rendement musculaire?

$$\begin{aligned} \eta_{\text{musculaire}} &= \dot{W}_{\text{méca}} / \dot{E} \\ &= 4,3 / 17,8 = \underline{0,24} \end{aligned}$$

Quantification de l'énergie chimique

Energie fournie par les substrats

- En condition aérobie
 - Méthode calorimétrique
 - Méthode de thermochimie respiratoire
- En condition anaérobie
 - Méthode directe
 - Méthode du déficit cumulé en O₂
 - Méthode de Margaria
 - Méthode électro myographique



Méthode directe

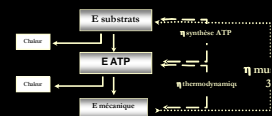
Principe : mesure des variations des concentrations en ATP, Phosphocréatine et glycogène

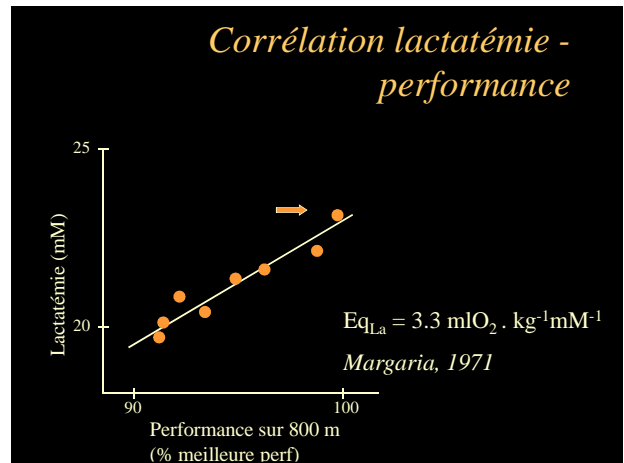
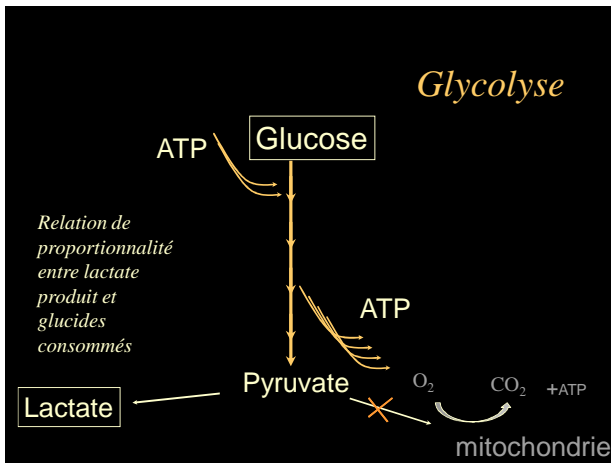
- Méthode invasive
- Peu précise en raison des approximations nécessaires effectuées pour la masse musculaire active



Conversion de l'énergie chimique en mécanique

- principes généraux de thermodynamique
- conversion de l'énergie chez l'homme
- définitions
- rendement musculaire
 - Quantification de l'énergie chimique
 - Rendement de la synthèse d'ATP
 - Rendement thermodynamique





Puissance consommée sur 400 m?

Quelle est la puissance consommée par Collard, le meilleur coureur du groupe (45 s sur 400 m), sachant que sa $\dot{V}O_2$ est de 40 ml/min/kg en moyenne sur 400 ?

(Record du monde 43'18'' de Michael Johnson)

Méthode de Margaria (1971)

$$\dot{E} \text{ (mlO}_2\text{/min/kg)} = (\dot{V}O_2 - \dot{V}O_{2\text{repos}}) + (\Delta [\text{la}] * E_{q_{La}}) / T$$

$$\dot{E} = (40 - 5) + (20 * 3,3) / 0,75$$

(où $T = 45 \text{ s} = 0,75 \text{ min}$)

$$= \underline{123 \text{ mlO}_2\text{/min/kg}}$$

Parts aérobie et anaérobie?

Part aérobie : $\dot{V}O_{2\text{net}} / \dot{E} = 35 / 123 = \underline{28\%}$
 Part anaérobie : $100 - 28 = \underline{72\%}$

Puissance consommée en W/kg ?

- Quelle est la puissance consommée à partir des substrats sachant qu'il s'agit d'un exercice d'intensité élevée ?
- R: $E_{q_{O_2}} = 21,3 \text{ J/mlO}_2$
 unité : $\text{W/kg} = \text{J/s/kg}$
 $\dot{E} = 123 / 60 * 21,3 = \underline{43,7 \text{ W/kg}}$

Rendement musculaire ?

Sachant que la puissance mécanique développée par Collard pour courir à une vitesse de 8,8 m/s est de 20 W/kg, quel est son rendement musculaire ?

$$\eta_{\text{musculaire}} = \dot{W}_{\text{méca}} / \dot{E} = 20 / 43.7 = 0.46$$

Valeur >> au rendement du pédalage !?

Rendement en fonction du régime de contraction



24%

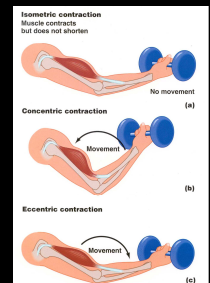
concentrique



46%

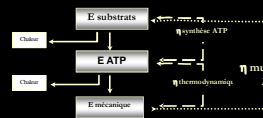
Excentrique -
concentrique

3 types d'action musculaire :

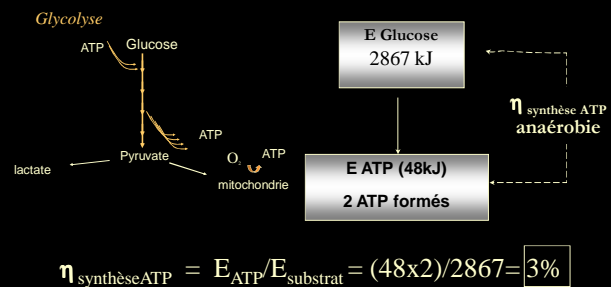


Conversion de l'énergie chimique en mécanique

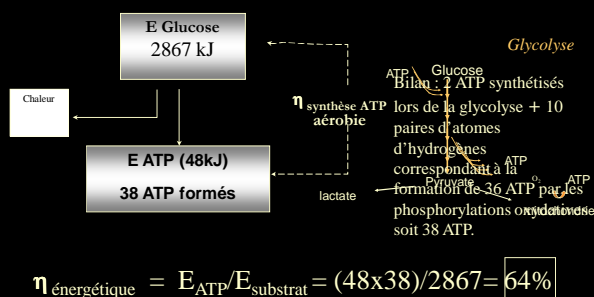
- principes généraux de thermodynamique
- conversion de l'énergie chez l'homme
- définitions
- rendement musculaire
 - Quantification de l'énergie chimique
 - Rendement de la synthèse d'ATP
 - Rendement thermodynamique



Rendement de la synthèse d'ATP en condition anaérobie

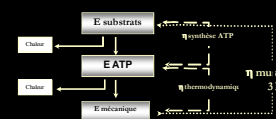


Rendement énergétique pour le glucose en présence d'O2

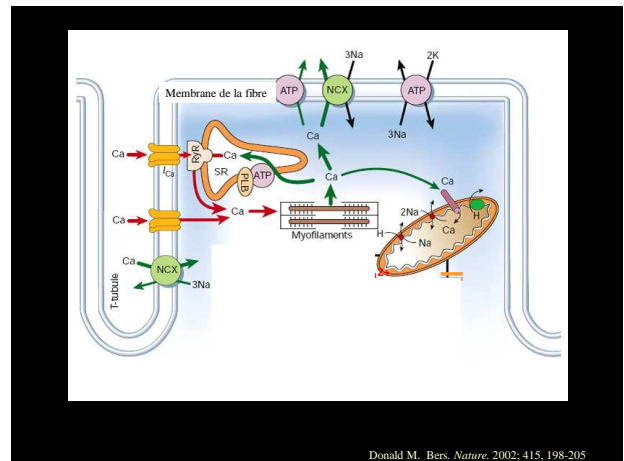
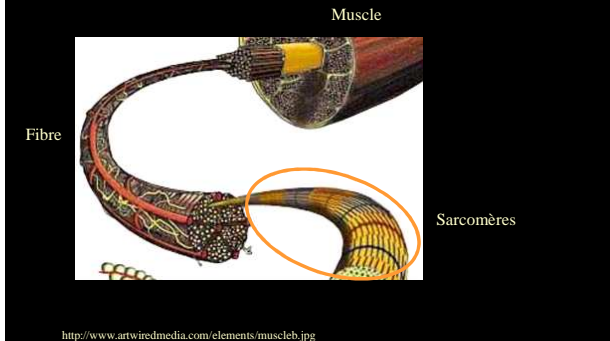


Conversion de l'énergie chimique en mécanique

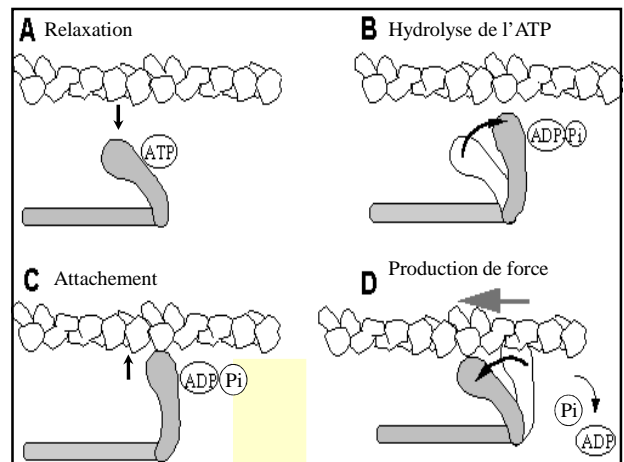
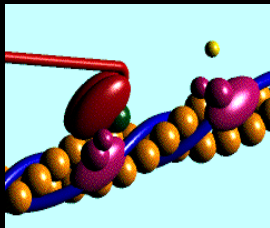
- principes généraux de thermodynamique
- conversion de l'énergie chez l'homme
- définitions
- rendement musculaire
 - Quantification de l'énergie chimique
 - Rendement de la synthèse d'ATP
 - Rendement thermodynamique



Rappel sur l'architecture du muscle

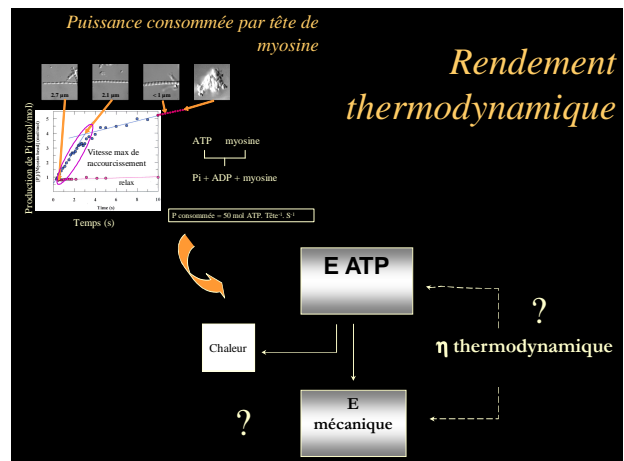


Puissance développée par tête de myosine

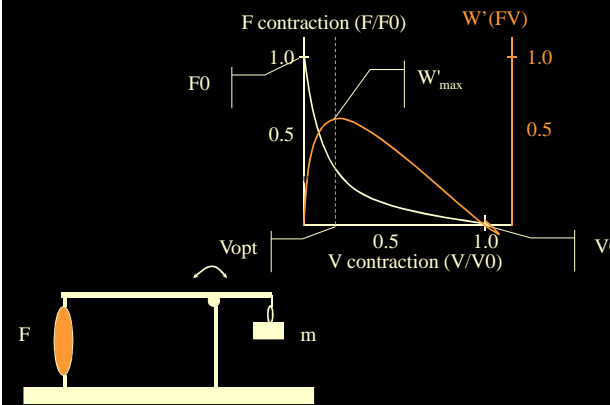


4 principales étapes du cycle mécano-chimique

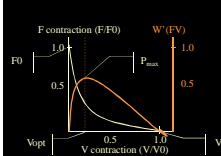
- Détachement grâce à la fixation de l'ATP
- Hydrolyse de l'ATP en ADP et Pi et bascule de la tête
- Fixation actine-myosine
- Production de force avec bascule de la tête et libération de Pi suivie de celle de l'ADP



Puissance mécanique



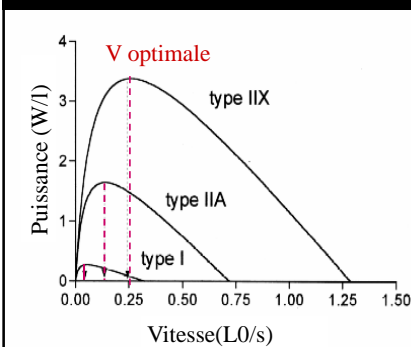
Puissance mécanique



Descripteurs des caractéristiques contractiles

- W'_{max} = puissance maximale
- V_{opt} = vitesse optimale de raccourcissement
- F_0 = force maximale isométrique (quand la vitesse est nulle)
- V_0 = vitesse maximale de raccourcissement (quand la force est nulle)

Différents types de fibres musculaires

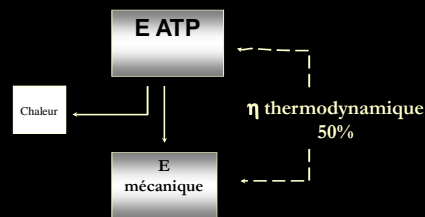


Les différentes vitesses optimales de raccourcissement permettent d'expliquer la variété des tâches motrices possibles

Rome et al. 1995
Bottinelli et Reggiani 2000

Rendement thermodynamique

$$\eta_{\text{thermodynamique}} = \frac{\dot{W}}{\dot{E}} = 50\%$$



Plan

Introduction

- Conversion Energie chimique en mécanique et définitions
- Travail contre les forces de friction
- Travail potentiel
- Travail cinétique
- Conservation d'énergie
- Travail et fatigue



Quelques grandeurs et égalités

Puissances mécanique et consommée

Unité : J/s ou W (le plus souvent normalisée par rapport à la masse corporelle dans les locomotions humaines)

$$\eta = W' / E' \quad (1)$$

La puissance mécanique est proportionnelle à la puissance consommée à un facteur près (le rendement musculaire) :

$$W' = E' \eta \quad (2)$$

$$W' = F V \quad (F \text{ en N et } V \text{ en m/s}) \quad (3)$$

$$W' = W / T \quad (W \text{ en J et } T \text{ en s}) \quad (4)$$

Le Coût énergétique a la dimension d'un travail fourni contre les forces qui s'opposent au mouvement :

Vue Synthétique

$$\bar{V} = \frac{\dot{E}}{C}$$



Synthèse

J.E. Marey, 1899, Chronophotographie

- Le coût énergétique renseigne sur l'efficacité globale du mouvement
- La conversion de l'énergie chimique contenue dans les substrats dépend :
 - De la présence ou non d'oxygène
 - Du mode de contraction (Cycle E-R > concentrique)
- La dépense d'énergie est orientée vers 5 types de travaux fondamentalement différents ($W_{\text{aérodynamique}}$, W_{friction} , $W_{\text{potentiel}}$, $W_{\text{cinétique}}$, W_{interne})

Force de collision

Un rugbyman de 100 kg lancé à 36 km/h percute deux défenseurs de l'équipe adverse, quelle est la force de collision si l'impact ne fait reculer que de :

- 10 cm les 2 défenseurs
- d' 1 mètre les 2 défenseurs?

1. $\frac{1}{2} m v^2 = F d$ travail pour stopper le rugbyman
 $F = (\frac{1}{2} m v^2)/d$
 $F = (\frac{1}{2} \cdot 100 \cdot 10^2)/0,1$
 $F = 50\,000 \text{ N} \approx 50 \text{ kN}$

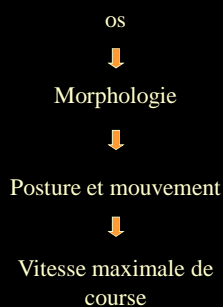
Force de collision

Un rugbyman de 100 kg lancé à 36 km/h percute deux défenseurs de l'équipe adverse, quelle est la force de collision si l'impact ne fait reculer que de :

- 10 cm les 2 défenseurs
- d' 1 mètre les 2 défenseurs?

2. $\frac{1}{2} m v^2 = F d$ travail pour stopper le rugbyman
 $F = (\frac{1}{2} m v^2)/d$
 $F = (\frac{1}{2} \cdot 100 \cdot 10^2)/1$
 $F = 5000 \text{ N} = 5 \text{ kN}$

Modèle avec segments articulés



Hutchinson et Gatesi, 2006 Nature

- Avec 90° de mvt et un pas de 1° => 67 millions de postures possibles => grande redondance des articulations => comment reproduire la locomotion?

Hutchinson et Gatesi, 2006 Nature

Solution : la simulation par ordinateur

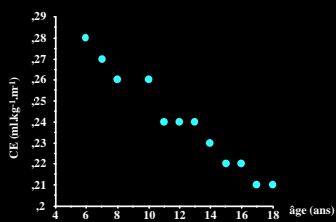
Placer des contraintes :

1. Sur les amplitudes de mvt (pas d'hyperextension sur le genou...)
2. Sur les forces de réactions au sol et l'équilibre dynamique du squelette

Une idée sur le mouvement que nous n'avons pas connu

Le moment de l'articulation du genou très important ne permet pas une vitesse supérieure 29km/h

Coût énergétique et âge



Evolution du coût énergétique de la course (CE) en fonction de l'âge chez des garçons âgés de 6 à 18 ans . Adapté de Krahenbuhl et al. (1989) et Daniels et al. (1973).

Coût énergétique de la marche chez l'enfant

$$\bar{V} = \frac{\dot{V}_{O2} - \dot{V}_{O2base}}{C}$$

$$C = \frac{\dot{V}_{O2} - \dot{V}_{O2base}}{\bar{V}}$$

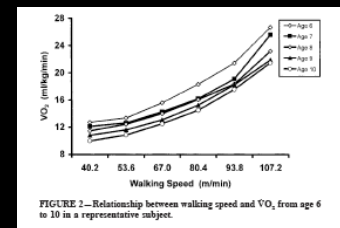


FIGURE 2—Relationship between walking speed and \dot{V}_{O_2} from age 6 to 10 in a representative subject.

Morgan et al., MSSE 2003, 34 : 2097-2012

Les facteurs de la perf ds le sprint

- $V = \text{Pana}/C$

$$W_{cin} = \frac{1}{2} m (V_{max}^2 - V_{min}^2)$$

$$W_{int} (f)$$

$$W_{pot} = m g \Delta H$$

$$R_a = \frac{1}{2} S C_x \rho V^2$$