



Froome, 2016

L1 UE22 A

Biomécanique du mouvement humain

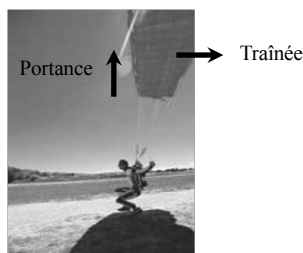
Robin.candau.free.fr
Robin.candau@umontpellier.fr

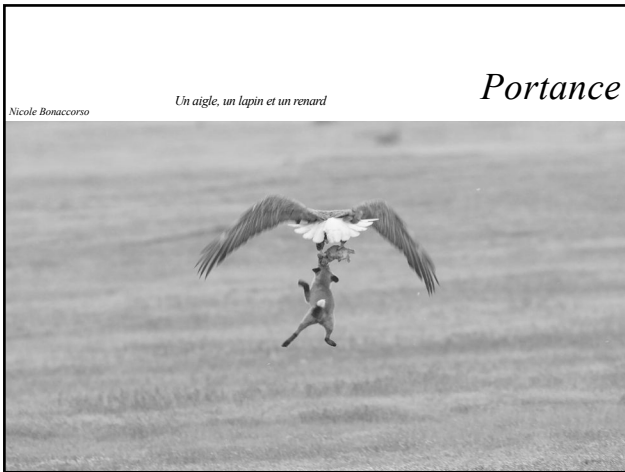
Résistances aérodynamiques et de friction avec le sol



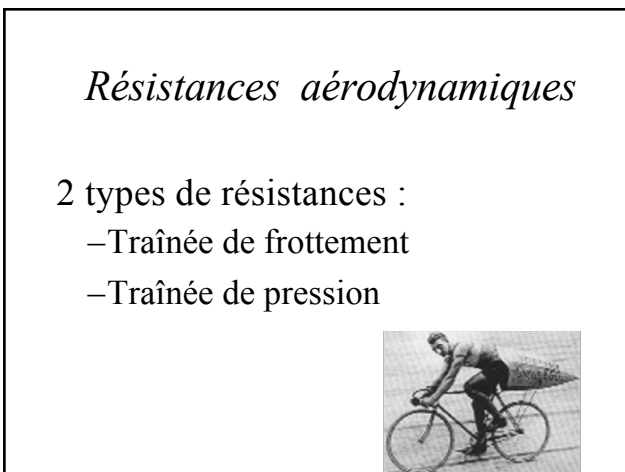
Trainée et portance

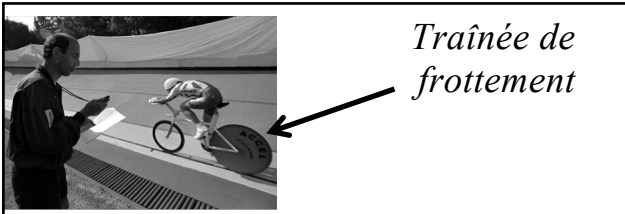
1. La portance → faible influence dans les locomotions terrestres en raison des faibles
2. la trainée ou résistance aérodynamique → un rôle majeur pour les locomotions les plus rapides (et dans la locomotion aquatique)











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 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.

Part relative de la traînée de pression et de frottement

Shape and flow	Form Drag	Skin friction
	0%	100%
	~10%	~90%
	~90%	~10%
	100%	0%

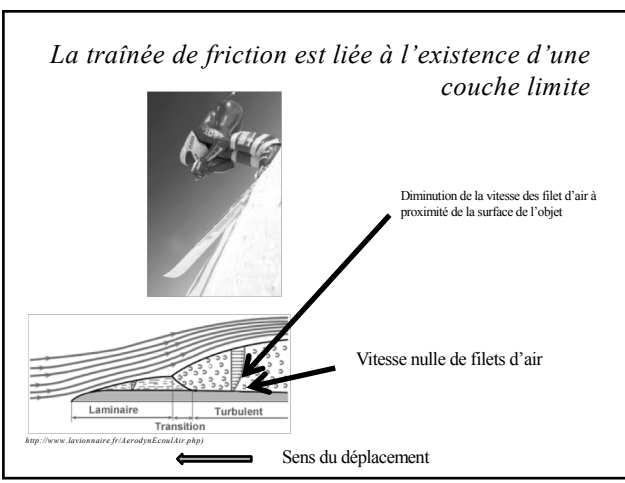
Plus les objets sont profilés plus la traînée de pression est réduite et plus la part relative de traînée de frottement augmente

La locomotion humaine correspond plutôt à ce cas

L'orientation des segments corporels détermine la part relative des traînées change ⇒ Design particulier des combinaisons pour chaque segment

[http://en.wikipedia.org/wiki/Drag_\(physics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Drag_(physics))

La traînée de friction est liée à l'existence d'une couche limite



Diminution de la vitesse des filets d'air à proximité de la surface de l'objet

Vitesse nulle de filets d'air

Laminaire Transition Turbulent

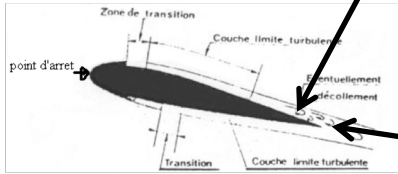
Sens du déplacement

<http://www.lavoisinaire.fr/AerodyneEcol/10r.php>



Saint-Exupéry ds son 1^{er} avion de chasse

Point de décollement



en rapport avec la traînée dans le sillage

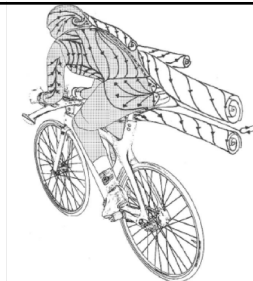


Bode Miller, Sochi 2014

Optimisation

- Surface de friction diminuée
- Surface lisse (plastifiée, combinaison enduite à maille fine)

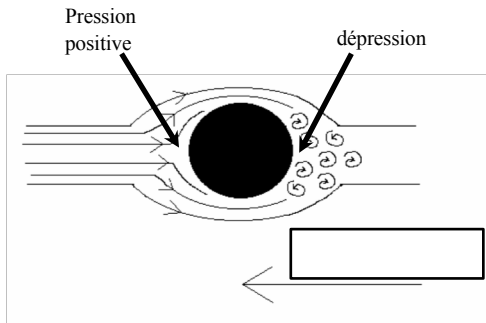
Traînée de pression



Crouch et al., 2017

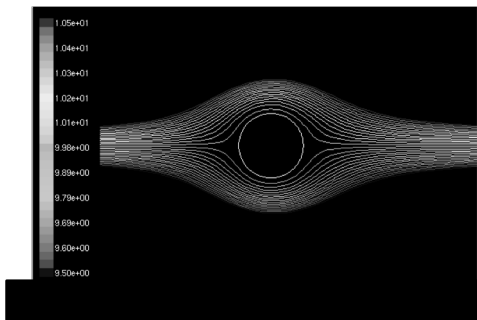
- l'essentiel des résistances aérodynamiques
- due à une asymétrie de pression entre avant et arrière du corps en mouvement
- création de vortex

Trainée de pression

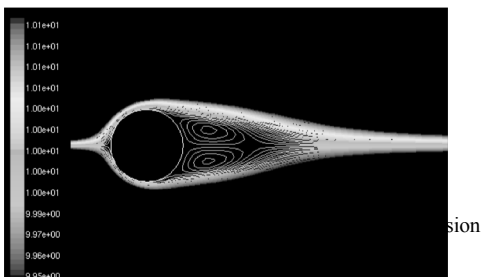


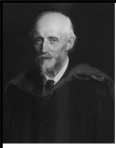
Fluide parfait

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



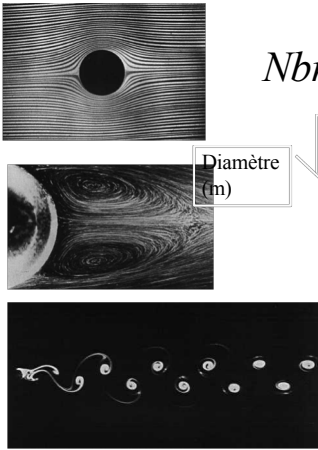
Fluide visqueux





Nombre de Reynolds

- a été proposé en 1883 par Osborne Reynolds.
- Il caractérise un écoulement, laminaire, transitoire ou turbulent
- Il représente le rapport adimensionnel entre les forces d'inertie et les forces visqueuses




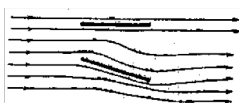
Nbre de Reynolds

$$Re = \frac{DV\rho}{\mu}$$

Diamètre (m) → D
 Vitesse (m/s) → V
 Densité (kg.m⁻³) → ρ
 Viscosité [kg/(m.s)] → μ

2 types d'écoulement

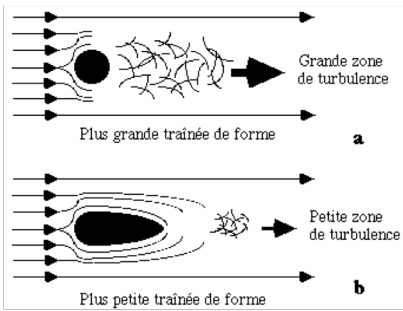
- Turbulent
 

Nbre Reynolds (Re)
Re > 10000
- Laminaire
Plaque dans l'axe des filets d'air ou inclinée (<30°)
 

2000 < Re < 10000
intermédiaire
Re < 2000

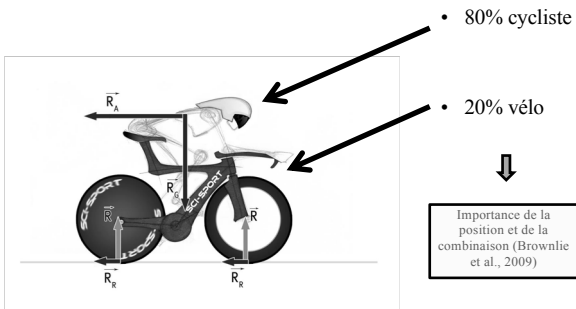
Léonard de Vinci

Forme de l'objet et importance de la dépression

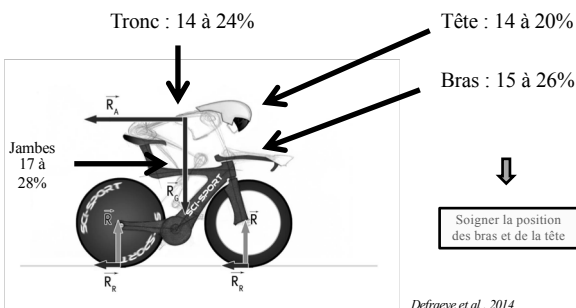


Les filets d'air suivent plus facilement le profil et le point de décollement est alors plus reculé

Résistances aérodynamiques en cyclisme



Contribution différentes parties du corps



Les différents types de roue et leur performance et effet du vent de côté

Les roues représentent l'essentiel de la traînée du vélo

Tew and Snyers, 1999

Casques

Facteurs de Résistances aérodynamiques

Résistances aérodynamiques (N)

Surface (m²)

Coefficient de forme

$$R_A = 1/2 S C_x \rho v^2$$

coefficient de traînée aérodynamique (m²)

Densité (kg/m³)

Vitesse (m/s)

Résistances aérodynamiques?

Pour G. Obree lors de son record du monde de l'heure établi à 53 km en 1993 sachant qu'il possédait un coefficient de traînée aérodynamique de 0.19 m^2 ?



Résistances aérodynamiques?

$$\begin{aligned} R_A &= 0,5 \quad S C_x \quad \rho \quad v^2 \\ &= 0,5 * 0,19 * 1,22 * (53/3,6)^2 \\ &= \underline{25 \text{ N}} \end{aligned}$$



Puissance aérodynamique?

$$\begin{aligned} (\text{rappel}) \quad W' &= F \quad v \\ \text{ici} \quad W'_{Ra} &= R_a \quad v \\ &= 25 * (53/3,6) \\ &= \underline{370 \text{ W}} \end{aligned}$$



Puissance consommée?

Travail personnel

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

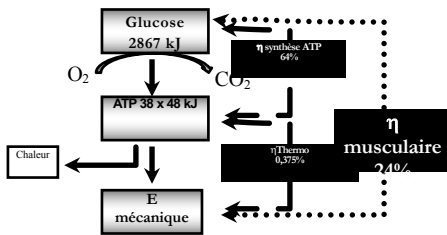


Rendement musculaire



Bernard Thevenet

En condition aérobie et en oxydant des glucides



Puissance consommée?

Isoler E

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

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



Dans nos conditions

$$\dot{E} = \frac{370}{0.24} = 1542 \text{ W}$$

$V'O_2$ (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) ?

$$\begin{aligned} V'O_{2\text{exer}} &= (E' / EqO_2) / m + V'O_{2\text{repos}} \\ (\text{ml/min/kg}) &= (\text{J/min}) / (\text{J/mlO}_2) / (\text{kg}) + (\text{ml/min/kg}) \\ &= ((1542*60)/21,3) / 65 + 5 \\ &= 67 + 5 \\ &= \underline{72 \text{ ml/min/kg}} \end{aligned}$$



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

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



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

$$V'O_2 = V'O_{2max} \cdot 0,9$$

$$V'O_{2max} = V'O_2 / 0,9$$

$$= 72 / 0,9$$

$$= \underline{80 \text{ ml/min/kg}}$$

•

Détermination de $V'O_{2max}$ à partir d'une performance sur 7min

Travail personnel

1. Mesure de la distance et du dénivelé
2. Calcul de la puissance aérodynamique et de la puissance potentielle
3. Détermination de la puissance mécanique externe
4. Détermination de la puissance consommée et de VO_{2max}





Thibault Prugne

Facteurs des résistances aérodynamiques

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

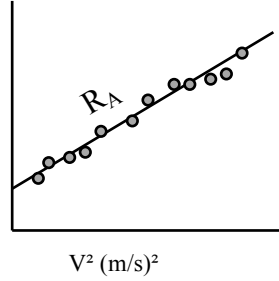
- Vitesse
- Surface frontale
 - Définition
 - Exemple sur l'homme
- Coefficient de forme
 - Formes simples et cas des locomotions
 - Position (angle par rapport aux filets d'air)
 - nbre de Reynolds

R_A = résistances aérodynamiques, $S C_x$ = coefficient de traînée aérodynamique, ρ = densité de l'air, v = vitesse

R_A augmente avec le carré de la vitesse

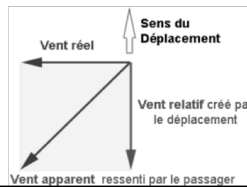


Résistances Totales (N)



Vitesse des filets d'air

La vitesse des filets d'air par rapport au cycliste dépend de la vitesse de déplacement du cycliste, la vitesse du vent atmosphérique et de son angle β par rapport à la trajectoire du cycliste





Vitesse apparente des filets d'air sur le cycliste

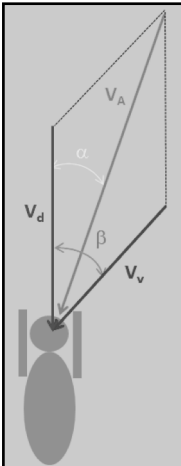


Dépend de la vitesse de déplacement (V_d) et la vitesse du vent atmosphérique (V_v) et de son angle par rapport à l'axe de déplacement (β , rad) :

$$V_a = \sqrt{V_d^2 + V_v^2 + 2 \cdot V_d \cdot V_v \cdot \cos \beta}$$

Pinat, 2013, thèse

Quelle est la vitesse des filets d'air sur le corps du cycliste?



Un cycliste qui se déplace à 36 km/h lutte contre un vent de côté ($45^\circ = 1,57$ rad) lui aussi de 36 km/h quelle la vitesse du vent contre laquelle le cycliste fournit un effort ?

$$V_a = \sqrt{V_d^2 + V_v^2 + 2 \cdot V_d \cdot V_v \cdot \cos \beta}$$

$$\begin{aligned} &= \text{racine}(10^2 + 10^2 + 2 \cdot 10 \cdot 10 \cdot \cos(1,57)) \\ &= 14,14 \text{ m/s} \\ &= \underline{50,91 \text{ km/h}} \end{aligned}$$

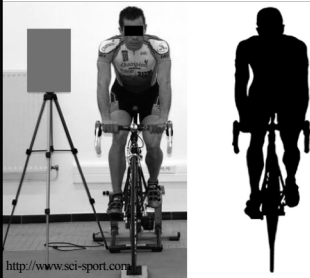
Facteurs des résistances aérodynamiques

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



- 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

Surface frontale (S)



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

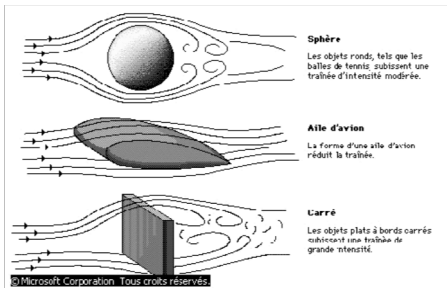


La résistance est proportionnelle à la surface

<http://www.sci-sport.com>

Coefficient de forme

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



C_x

0.47

0.04

1.8

Shape Drag Coefficient

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

Measured Drag Coefficients

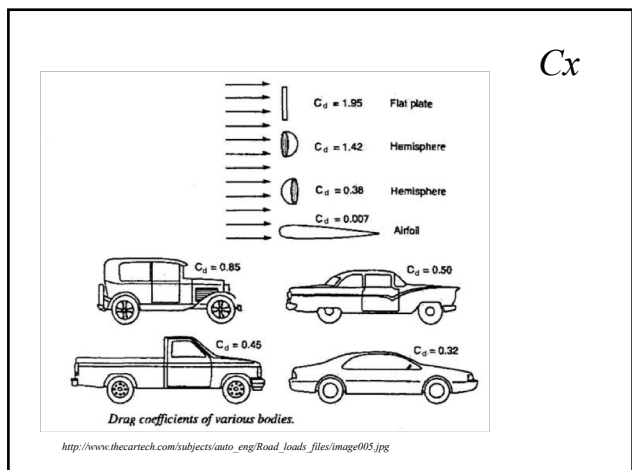
C_x

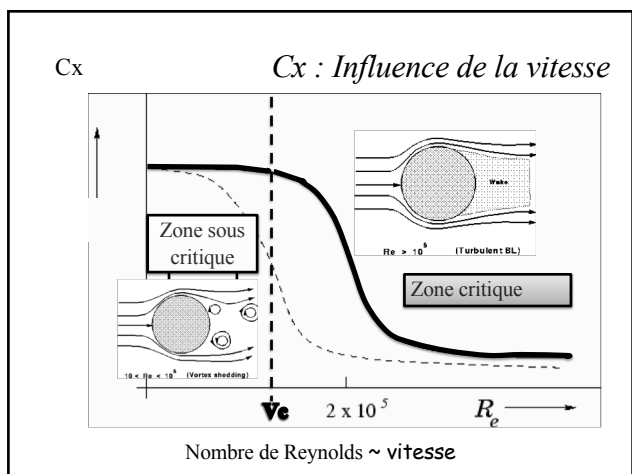
Geometry	Geometry	Geometry
Ellipsoid $x = \text{chord } (c)$ $A = c(b)$ $Re \approx 1 \times 10^5$ $C_D \approx 0.1$	Sphere $x = \text{diameter } (d)$ $A = \frac{\pi}{4}d^2$ $Re \approx 1 \times 10^5$ $C_D \approx 0.05$	Faired - HPV $x = \sqrt{A}$ $A = \text{frontal}$ $Re \approx 1.5 \times 10^6$ $C_D \approx 0.07$
Circular Cylinder $x = \text{diameter } (d)$ $A = d(b)$ $Re \approx 5 \times 10^3$ $C_D \approx 0.4$	Sphere $x = \text{diameter } (d)$ $A = \frac{\pi}{4}d^2$ $Re \approx 5 \times 10^3$ $C_D \approx 0.1$	Fast - Road Car $x = \sqrt{A}$ $A = \text{frontal}$ $Re \approx 4 \times 10^5$ $C_D \approx 0.28$
60° Wedge $x = \text{width } (w)$ $A = w(b)$ $Re \approx 1 \times 10^5$ $C_D \approx 1.4$	Sphere $x = \text{diameter } (d)$ $A = \frac{\pi}{4}d^2$ $Re \approx 1 \times 10^4$ $C_D \approx 0.5$	Small Bus $x = \sqrt{A}$ $A = \text{frontal}$ $Re \approx 3.5 \times 10^6$ $C_D \approx 0.42$
90° Wedge $x = \text{width } (w)$ $A = w(b)$ $Re \approx 1 \times 10^5$ $C_D \approx 1.6$	60° Cone $x = \text{diameter } (d)$ $A = \frac{\pi}{4}d^2$ $Re > 1 \times 10^4$ $C_D \approx 0.8$	Cyclist - Time Trial $x = \sqrt{A}$ $A = \text{frontal}$ $Re \approx 7 \times 10^5$ $C_D \approx 0.60$
Flat Plate $x = \text{width } (w)$ $A = w(b)$ $Re \approx 1 \times 10^5$ $C_D \approx 2.0$	90° Cone $x = \text{diameter } (d)$ $A = \frac{\pi}{4}d^2$ $Re > 1 \times 10^4$ $C_D \approx 1.15$	Semi - Trailer $x = \sqrt{A}$ $A = \text{frontal}$ $Re \approx 6 \times 10^6$ $C_D \approx 0.70$
	Disk $x = \text{diameter } (d)$ $A = \frac{\pi}{4}d^2$ $Re > 1 \times 10^5$ $C_D \approx 1.1$	Cyclist - Upright $x = \sqrt{A}$ $A = \text{frontal}$ $Re \approx 7 \times 10^5$ $C_D > 0.80$

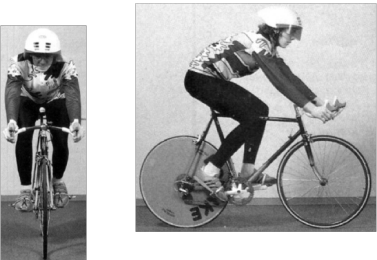
Véhicule à propulsion humaine

Position contre la montre

Position relevée









$SCx \sim 0.35 m^2$



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

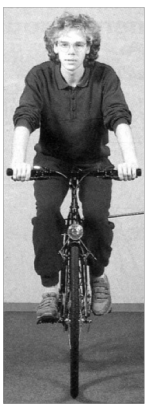





$SCx \sim 0.30 m^2$

$SCx \sim 0.25 m^2$



$SCx = 0.71 m^2$



Facteurs de RA suite

Densité du fluide

- locomotion terrestre vs. Aquatique
- altitude



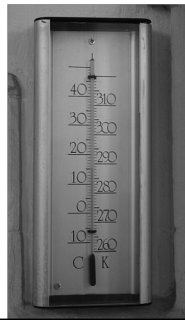


Densité de l'air

La densité de l'air (ρ en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) dépend de la pression barométrique du lieu (PB en mmHg) et de la température (T en degré Celsius) :

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

Où ρ_0 est la densité de l'air pour une PB de 760mmHg et T de 273 kelvin (0 C°), $\rho_0 = 1,229 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$



Locomotion terrestre vs. Aquatique

A 3,6 km/h (1 m/s), quelles sont les résistances aérohydrodynamiques de la locomotion terrestre et celle aquatique ?



Locomotion terrestre

$$\begin{aligned} R_A &= 0,5 \text{ SC}_x \rho v^2 \\ &= 0,5 * 0,3 * 1,22 * (1)^2 \\ &= \underline{0.18 \text{ N}} \quad \text{très faible!!} \end{aligned}$$



Locomotion aquatique

$$\begin{aligned} R_A &= 0.5 \text{ SC}_x \rho v^2 \\ &= 0.5 * 0.2 * 1000 * (1)^2 \\ &= \underline{100 \text{ N}} \end{aligned}$$



Résistance et donc travail et coût énergétique
600 fois supérieurs !

Optimisation des résistances aérodynamiques

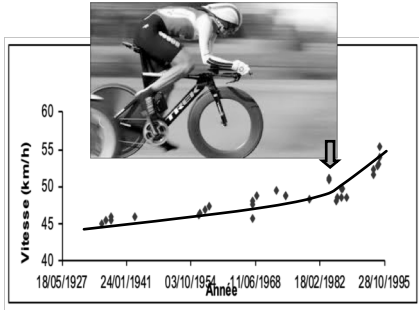
- évolution du record de l'heure
- optimisation de la position
 - du buste
 - des membres supérieurs
 - des membres inférieurs
- optimisation du matériel
 - profile des tubes
 - carénage
 - position des accessoires



$$R_A = 0,5 \text{ SC}_x \rho v^2$$

R_A = Résistance aérodynamique en N, SC_x = ρ = densité de l'air en kg/m³ et v = Vitesse

Evolution du record de l'heure

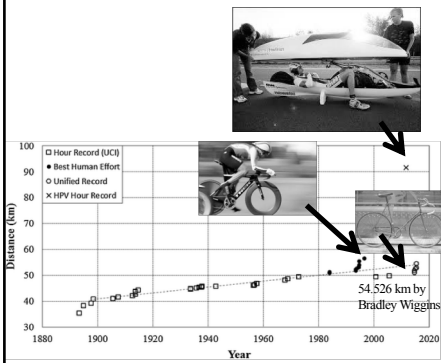


A partir des années 1980, grand intérêt pour l'aérodynamisme



Grande augmentation de performance

Evolution du record de l'heure

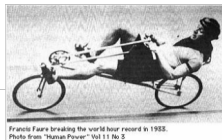


Véhicules à propulsion humaine aérodynamiques



Grande augmentation de performance

Francis Faure couvre 45.1 km dans l'heure au vélodrome de Paris en 1933



www.bikefit.co.uk/forbiddea.html



[//www.velorizonta.com](http://www.velorizonta.com)

Record de l'heure pour les véhicules à propulsion humaines



92,432km
Francesco Russo
 (Suisse), 26 juin 2016, S = 0.238 m²,
 Cx = 0,07



84,02 km
Barbara Buatois
 (F) 19/07/2009 sur vélo couché caréné
 Vainca Tempest à Romeo, Michigan (Etats-
 Unis)

Record de l'heure pour les véhicules à propulsion humaines



Quelle est la puissance requise pour maintenir 92 km/h?



92,432km
Francesco Russo
 (Suisse), 26 juin 2016, S = 0.238 ?
 m², Cx = 0,07, Cr = 0,005

$$W_{\text{a}} = 1/2 \cdot S \cdot C_x \cdot \rho \cdot V^3$$

$$= 0,5 \cdot (0,238 \cdot 0,07) \cdot 1,22 \cdot (92,432/3,6)^3$$

$$= 172 \text{ W}$$

$$W_{\text{RR}} = C_R \cdot m \cdot g \cdot V$$

$$= 0,005 \cdot 85 \cdot 9,81 \cdot (92,432/3,6)$$

$$= 107 \text{ W}$$

$$W' = 172 + 107$$

$$= \underline{\underline{279 \text{ W}}}$$

Travail personnel

Quelle vitesse peut être atteinte par un cycliste de l'élite mondiale?

Travail personnel



S = 0,238 m², Cx = 0,07, Cr = 0,005
90% de la puissance disponible en position couchée

$$W_{\text{aé}} = 1/2 S C_x \rho v^3$$

$$= 0,5 * (0,238 * 0,07) * 1,22 * (101,3,6)^3$$

$$= 224 \text{ W}$$

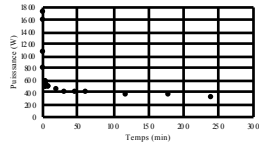
$$W_{\text{RR}} = C_R m g v$$

$$= 0,005 * 85 * 9,81 * (101,3,6)$$

$$= 117 \text{ W}$$

$$W' = 379 * 0,9$$

$$= \underline{\underline{341 \text{ W}}}$$



• 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).



Carénage

de fortune

Télécharger et analyser article vélo couché



David Peterson



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 la performance et d'où provient-il ?

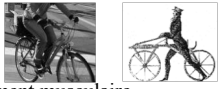
Pas d'améliorations marquées sur les résistances de roulement et aérodynamiques

Evolution du cyclisme

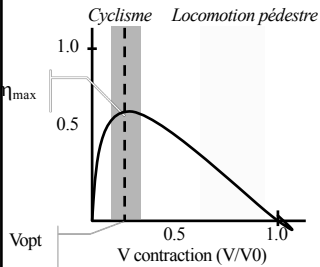
52 A. E. Minetti and others *Energetics and biomechanics of cycling history*

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	1820s	1860s	1870s	1880s	1890s	1980s
mass (kg)	25.7	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)	—	2.80	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 ^d	pneumatic ^e
brakes	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	0.0208 ± 0.0018	0.0284 ± 0.0026	0.0158 ± 0.0020	0.0200 ± 0.0029	0.0083 ± 0.0037	0.0083 ± 0.0037
air density ρ (kg m ⁻³)	1.193	1.192	1.186	1.209	1.195	1.201

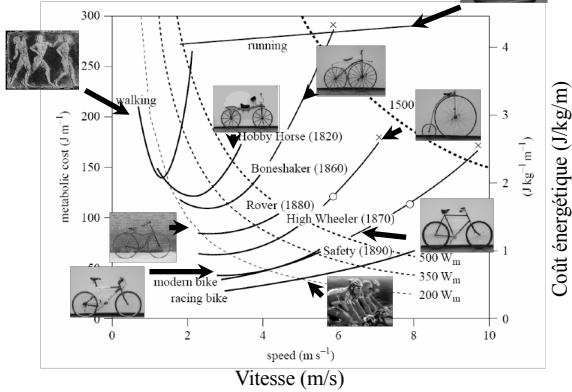


Rendement musculaire



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

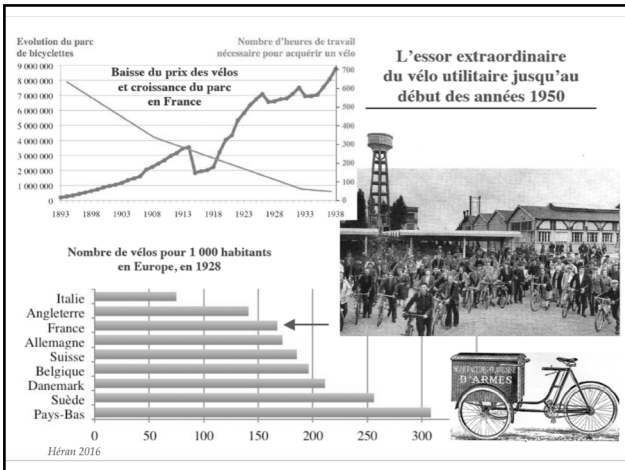
Différence de coût énergétique

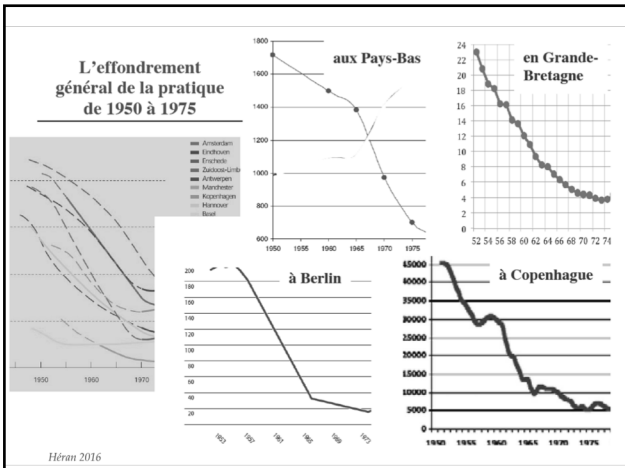


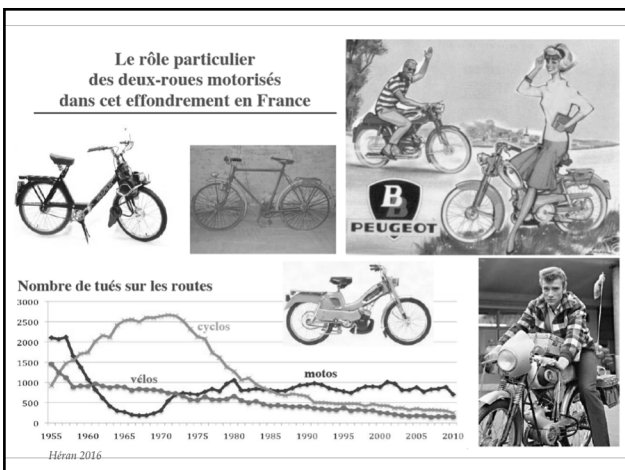


Le retour du vélo?

- L'essor du vélo utilitaire jusqu'en 1950
- Effondrement du cyclisme utilitaire de 1950 à 1975
- Remplacement par les 2 roues motorisés
- Le retour du vélo en ville
- Surtout grâce à une baisse du trafic auto







**La révolte des populations
contre l'envahissement automobile
au cours des années 1960-1970**



Héran 2016



Héran, 2016



**Le rôle clé des politiques de modération de la circulation
dans la relance de la pratique**



Pays-Bas, an. 70



Allemagne, an. 70-80



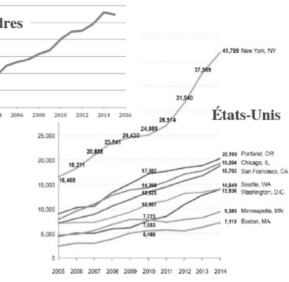
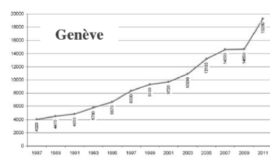
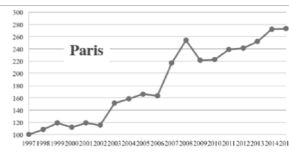
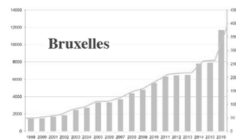
Italie, an. 70-80



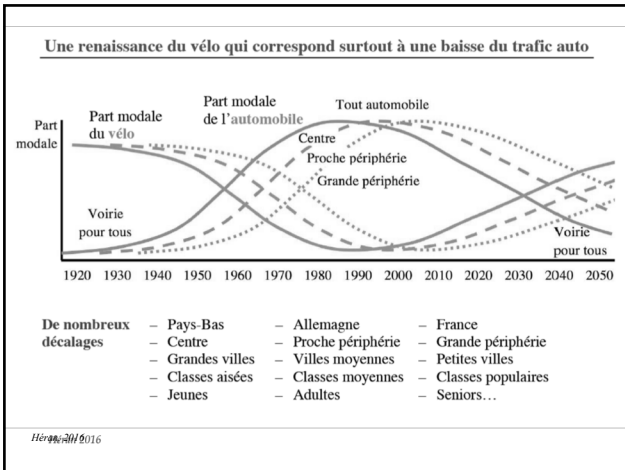
France, an. 90

Héran 2016

**Le retour du vélo dans toutes
les grandes villes occidentales**



Héran 2016



Optimisation des résistances aérodynamiques

- évolution du record de 1^h heure
- optimisation de la position
 - du buste
 - des membres supérieurs
 - des membres inférieurs
- optimisation du matériel
 - profile des tubes
 - carénage
 - position des accessoires

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

R_A = Résistance aérodynamique en N, S.C._x = ρ = densité de l'air en kg.m⁻³ et v = vitesse

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 en soufflerie

The results showed that:

1. the **handlebar height** had a greater influence on the drag area compared to handlebar separation,
2. but that there was a high degree of **variability between athletes** as to the optimal handlebar position.

Underwood et al., 2013



Record actuel 252 km/h par Simone Origone, 2015

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/goitsch68.jpg>

Optimisation des résistances aérodynamiques



- évolution du record de 1 'heure
- optimisation de la position
 - du buste
 - des membres supérieurs
 - des membres inférieurs
- optimisation du matériel
 - profile des tubes
 - carénage
 - position des accessoires

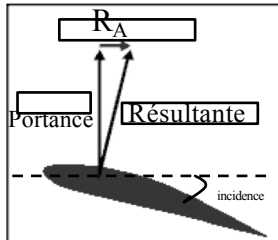
$$R_A = 0,5 S C_x \rho v^2$$

R_A = Résistance aérodynamique en N, $S C_x$ = ρ = densité de l'air en $kg.m^{-3}$ et v = vitesse

Écoulement 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



Carénages et Casques

Underwood et al, 2015

The results showed that :

1. **Head angle and nose-to-helmet distance** were more important in determining drag area than the number or position of ventilation holes, with only a slight reduction in aerodynamic drag for a helmet with no ventilation holes compared to multiple, large holes.
2. For an aero helmet, **proper helmet fitting** is more important than the details of the ventilation holes.





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

Part relative de la traînée de pression et de frottement

Shape and flow	Form Drag	Skin friction
	0%	100%
	~10%	~90%
	~80%	~20%
	100%	0%

Plus les objets sont profilés plus la traînée de pression est réduite et plus la part relative de traînée de frottement augmente

La locomotion humaine correspond plutôt à ce cas



L'orientation des segments corporels détermine la part relative des traînées change



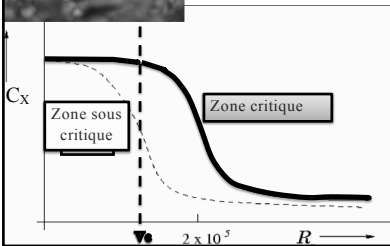
Design particulier des combinaisons pour chaque segment

[http://en.wikipedia.org/wiki/Drag_\(physics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Drag_(physics))

État de surface et coefficient de forme



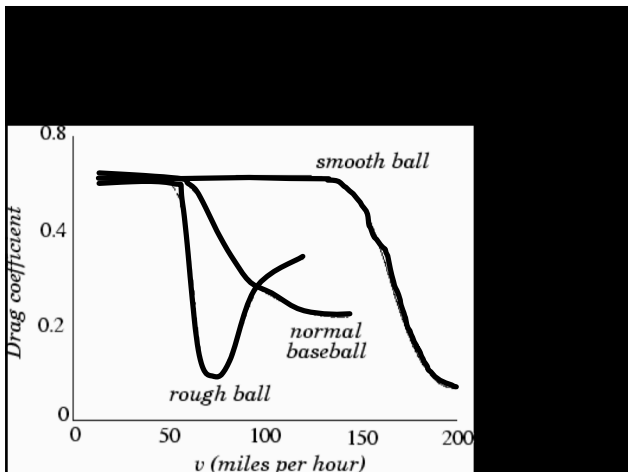
Fromme



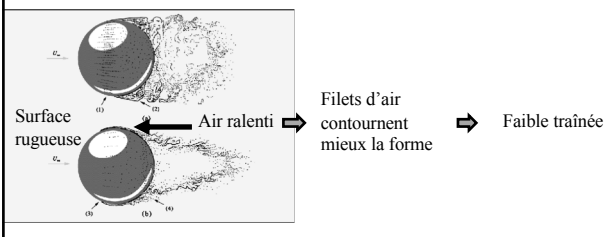
L'utilisation de surface rugueuse permet d'atteindre la zone critique pour des vitesses inférieures



↓ Cx
↓ Ra et ↓ C
↓ performance



Rugosités et traînée de pression



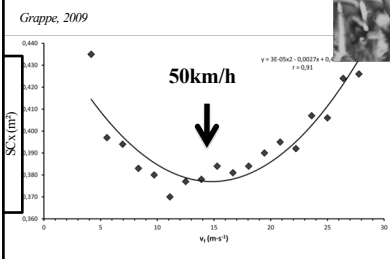
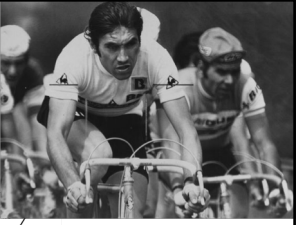


Quiz

La traînée de pression est diminuée avec une surface rugueuse ? Pourquoi ?

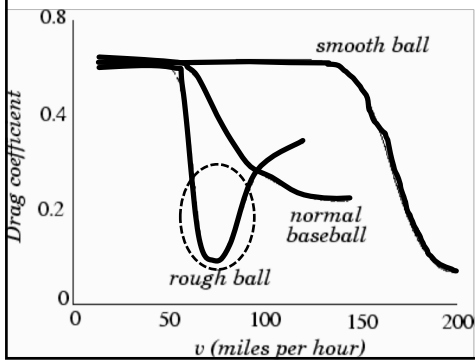
R : La traînée de friction augmente avec une surface rugueuse car les filets d'air immédiatement au contact des rugosités sont alors très ralentis et les forces de cisaillement à l'intérieur de la couche limite sont majorées. En revanche, la traînée de pression peut diminuer car les filets d'air ralentis peuvent plus facilement suivre les formes de l'objet en mouvement. La dépression à l'arrière est diminuée et l'athlète traîne moins d'eau.

Zone critique atteinte en cyclisme?

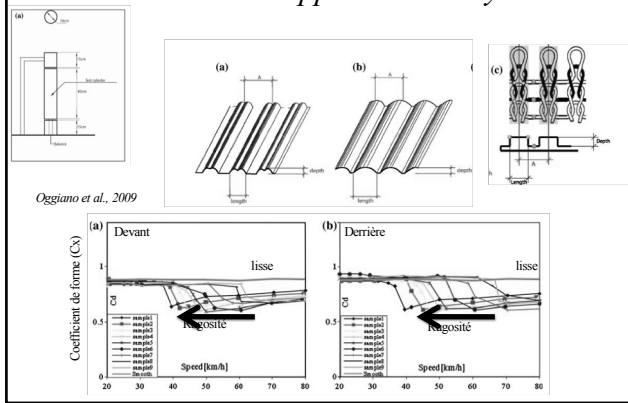


Influence de la vitesse de l'air (v_a , en $m \cdot s^{-1}$) sur SCx (m^2) pour un cycliste de haut-niveau en position traditionnelle aérodynamique sur une bicyclette de route standard en soufflerie

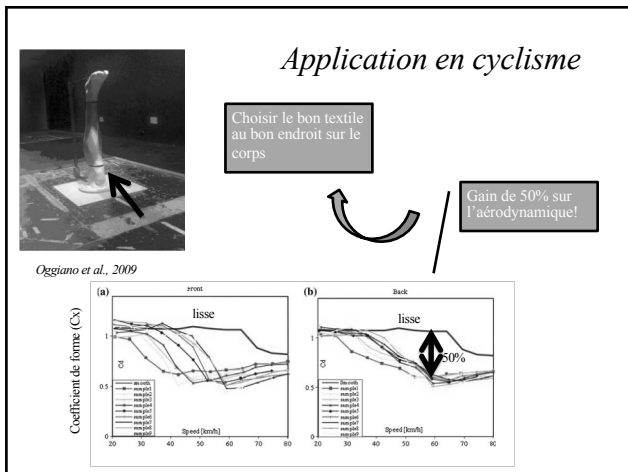
Cx pour différents types de balle



Application en cyclisme



Application en cyclisme



Aérodynamique

Dos lisse pour minimiser la traînée de friction, buste horizontal, tête sur le même axe pour optimiser la surface frontale

Rugosités sur les épaules, bras pour minimiser la traînée de pression

Casque avec visière intégrée pour optimiser le point d'attaque

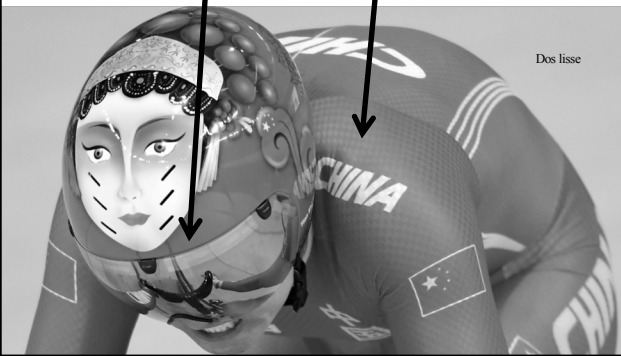


les bandes de Vortex réduisent en effet de 5% le coefficient de pénétration dans l'air, équivalent à une augmentation de puissance de l'ordre de 24

Casque avec visière intégrée et rugosités sur les épaules et les bras

La Chinoise Zhong Tianshi médaille d'or en poursuite par équipes à Rio. AFP

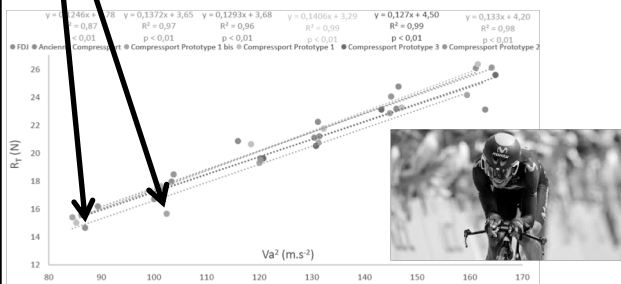
Dos lisse



Rugosité optimale sur les bras et épaules

Maille de 2 mm et d'un espacement de 1 cm

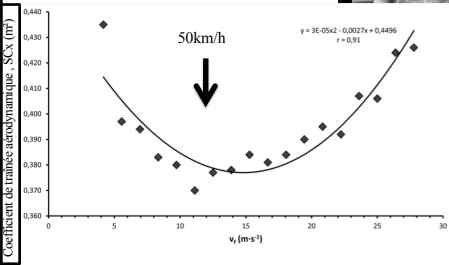
Mazic et Grappe, 2016



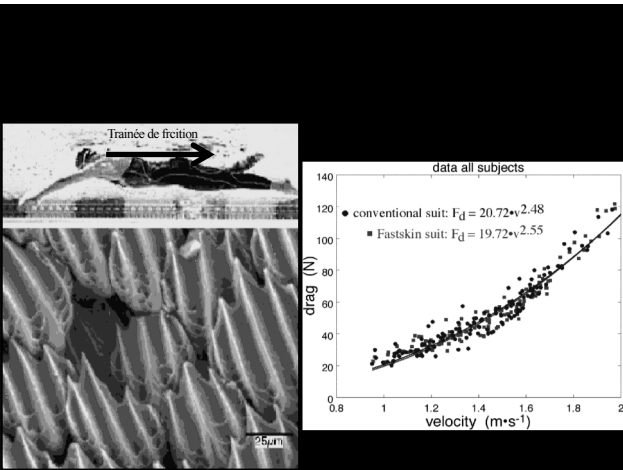
Zone critique en cyclisme



Grappe, 2009

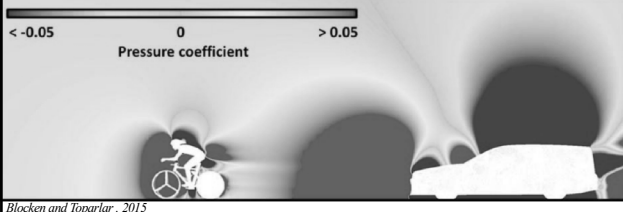


Tour de France Equipe P



Une voiture suiveuse diminue les résistances des cyclistes

Following car reduces cyclist drag



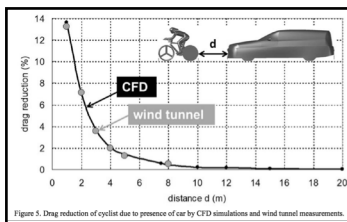


Figure 5. Drag reduction of cyclist due to presence of car by CFD simulations and wind tunnel measurements.

- Bénéfice de 14% à 1m
- A 10m plus d'effet

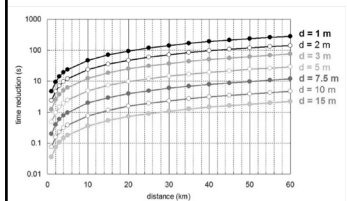


Figure 10. Nomogram indicating potential time reduction in an individual time trial as a function of the time trial distance, with the separation distance between cyclist and car as a parameter.

Blocken and Toparkar, 2015

- Bénéfice de 1'40'' à 1m sur 20km
- A 2m le bénéfice est réduit de moitié



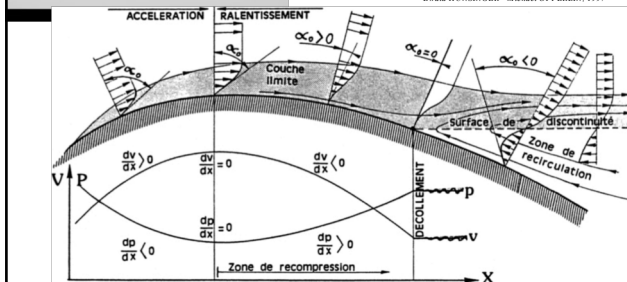
Suite optimisation Ra

- 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
- Optimisation des résistances hydrodynamiques



Modification du profil avec rembourrages

Ewald HUNSINGER - Michael OFFERLIN, 1997



Effets négatifs de l'altitude

La pression barométrique diminue avec l'altitude

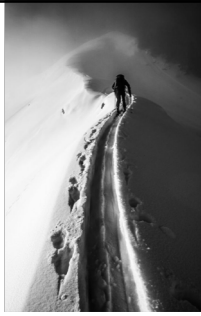
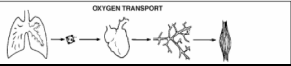
Or la fraction de l'O₂ est tjrs de 21%



La pression partielle en O₂ diminue

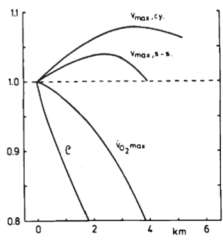
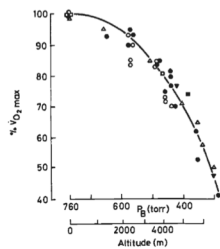
V'O_{2max} diminue

Figure 1

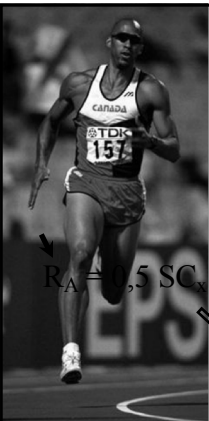


Réduction de V'O_{2max} en fonction de l'altitude

Di Prampero 1986



Effets antagonistes



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



↓ Pression barométrique

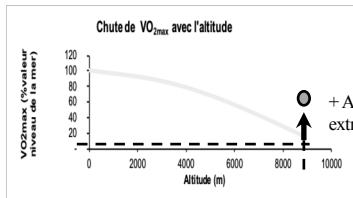
↓ Pression partielle en O₂

↓ V'O_{2max}

- 15 fév 19
1. Diapo part friction/pression
 2. Méthode de terrain RT
 3. Ralentissement des filets d'air

L'Everest en 8h10!

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



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

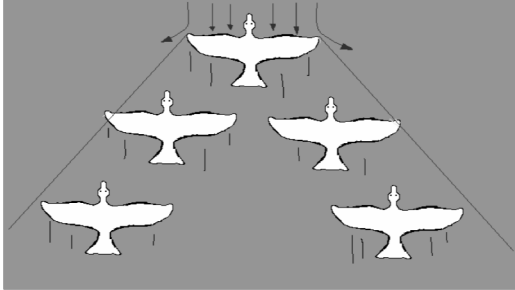




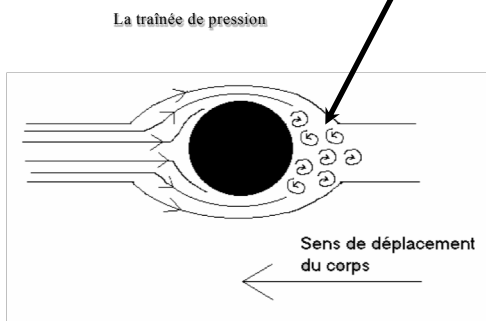
Suite optimisation R_a

- 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

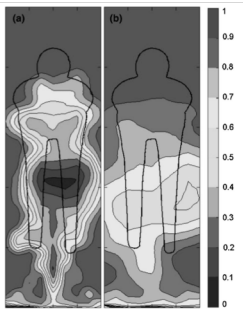


Bénéfice dans le cyclisme

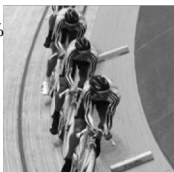
Barry et al., 2016

à 15 cm

à 1,5 m



Bénéfice de 30 à 60%
sur les résistances

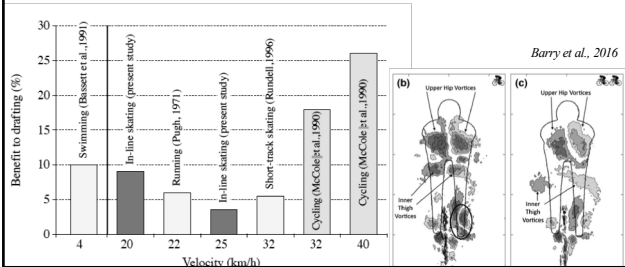




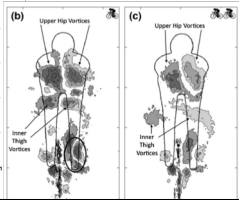
Bénéfice sur le coût énergétique

50% à 50 km/h
 Bénéfice en km/h = racine³ (50%) = 3,7 km/h
 car la puissance dépend de V³

Millet et al., 2003



Barry et al., 2016



Suite optimisation des résistances aérodynamiques

- Drafting
 - importance des bénéfices :
 - 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



Stratégies de drafting



1. l'éventail (en jaune)

Le portier : personne d'autre ne peut rentrer dans l'éventail (stratégie de course)

2. la bordure (rouge)

<http://cmaurepus.pagesperso-orange.fr>



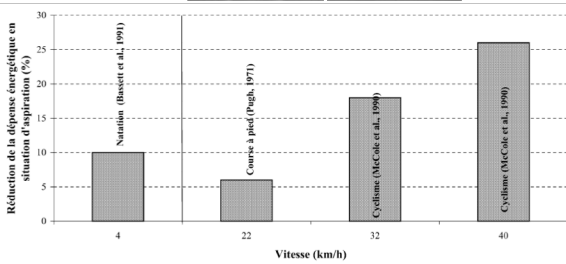
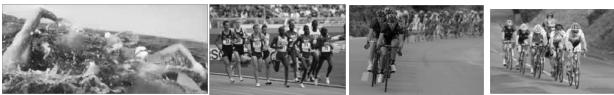
Facteurs techniques

- 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

Millet et Candau, 2002



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



Le mythe d'Icare

Le 23 avril 1988, Kanellos Kanellopoulos a parcouru une distance de 119 kilomètres, de la Crète jusqu'à l'île de Santorin

5 questions de QCM à l'examen final

→ Visionner la vidéo : https://www.youtube.com/watch?v=ag_jjvsQh10

- et noter :
1. La puissance requise pour le vol et les conséquences pour la conception du planeur
 2. Les compromis à réaliser dans la conception du planeur
 3. Les astuces utilisées pour obtenir une transition optimale entre l'écoulement laminaire à turbulent sur l'aile
 4. Les astuces utilisées pour diminuer la traînée induite par la portance en bout d'aile



Le mythe d'Icare

Travail personnel

Le 23 avril 1988, Kanellos Kanellopoulos a parcouru une distance de 119 kilomètres, de la Crète jusqu'à l'île de Santorin en 3 heures 55 minutes avec un léger vent arrière. La vitesse de vol par rapport à l'air était de 25 km/h

1. Quelle était la vitesse du vent?
2. Quelle était la puissance nécessaire sachant que le SC_x de l'avion était de 1 m²?

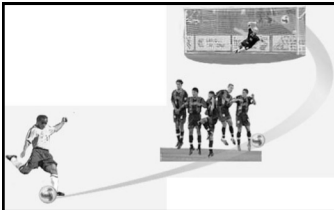


Réponse

Travail personnel

1. Vitesse sol = $119\,000\text{ m} / (3\text{h} \times 3600\text{s} + 55\text{min} \times 60\text{s}) = 8,4\text{ m/s}$
 Vitesse air = $25\text{km/h} / 3,6 = 6,94\text{ m/s}$
 Vitesse vent = $8,4 - 6,94 = 1,5\text{ m/s} = 5,4\text{ km/h}$

2. $W' = \frac{1}{2} SCx \rho V^3 = \frac{1}{2} \times 1 \times 1,22 \times 6,94^3 = 204\text{ W}$

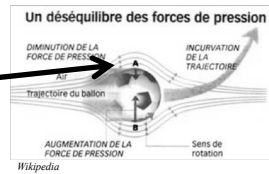


Effet Magnus

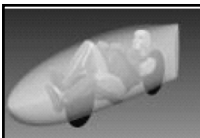
découvert par Heinrich Gustav Magnus (1802-1870), physicien allemand, permet notamment d'expliquer les effets de balle dans le sport et le fonctionnement de certains modes de propulsion.

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

Quand la vitesse d'un fluide augmente, sa pression diminue (principe de Bernoulli)



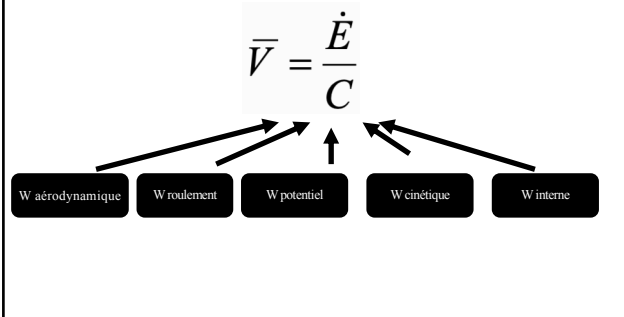
www.youtube.com/watch?v=ryFARhAMsk



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 ($(V \cdot O_{2max} \cdot f) / SCx$),)
- En course à pied pour des vitesses de sprint, R_A ne peut être négligé

Vue Synthétique



Plan

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



Résistances de friction



Coefficient de friction statique

Mike Dempsey alias Mikes But

Coefficient de friction dynamique

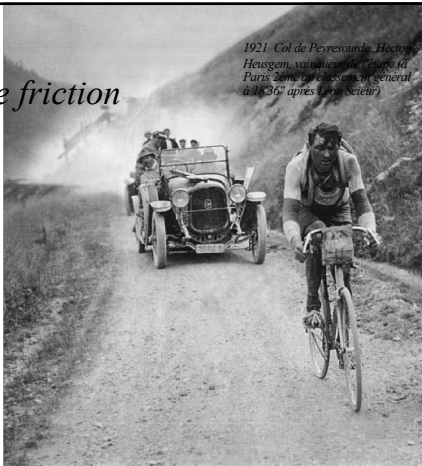


Résistances de friction

Origine :

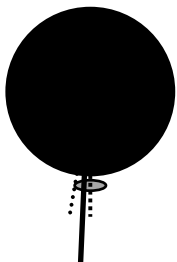
- friction entre les molécules qui constituent le pneumatique
- friction dans les roulements à billes et dans la chaîne

Importance de l'ellipse de contact du pneumatique au sol

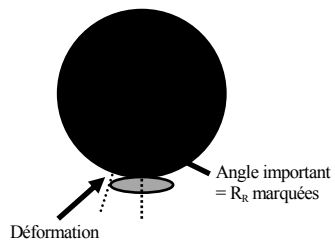


Ellipse de contact et friction

A/ pression 8 bars



B/ pression 2 bars



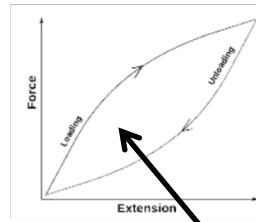
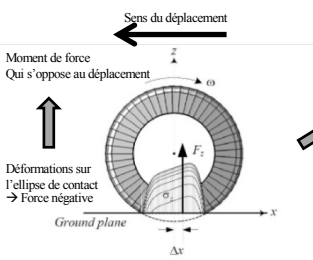
petit angle = faible déformation

Résistances de roulement



Mike Dempsey

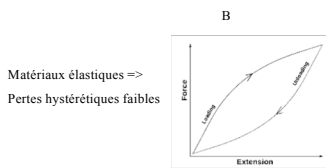
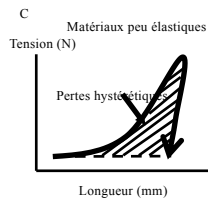
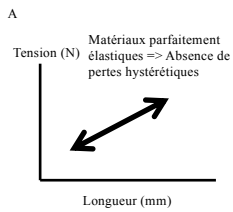
Déformation du pneumatique



Relation force - déformation et hystérésis

Suyabodha et al., 2017

Phénomène d'hystérésis



Sable, boue, neige : ↑ R_s

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 N

Facteurs des résistances de roulement

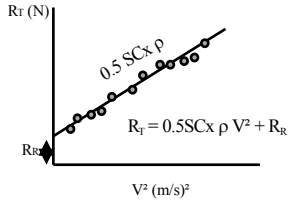
- Vitesse
- Force verticale
- Pression de gonflage
- Diamètres des roues
- Section du pneumatique
- Masse du pneumatique
- Structure du pneumatique
- Nature du revêtement



Vitesse

$$R_R = C_R m g$$

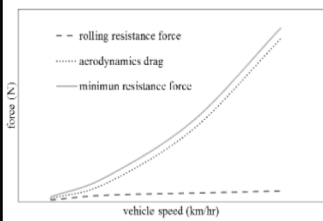
1/ Pour les locomotions humaines les R_R sont indépendantes de V





LeMans

R_R légèrement dépendantes des hautes vitesses



Sayabodha et al., 2017

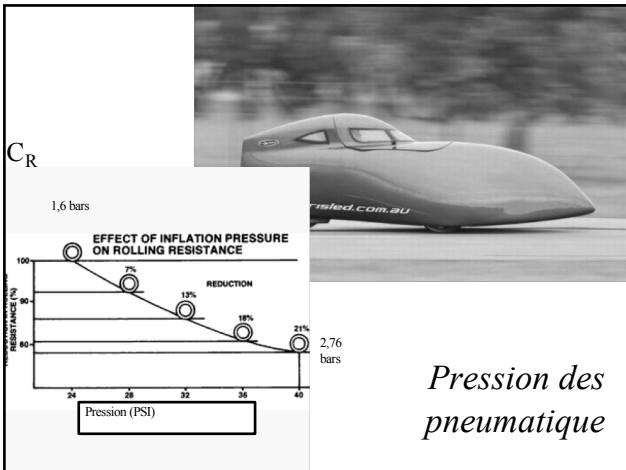
Facteurs des résistances de roulement

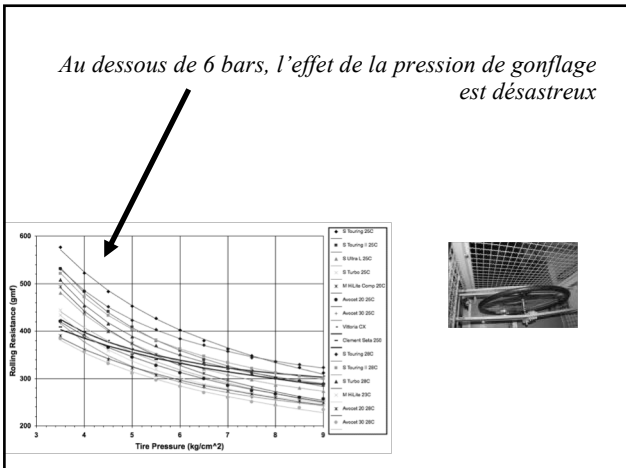
- Vitesse
- Force verticale
- Pression de gonflage
- Diamètres des roues
- Section du pneumatique
- Masse du pneumatique
- Structure du pneumatique
- Nature du revêtement

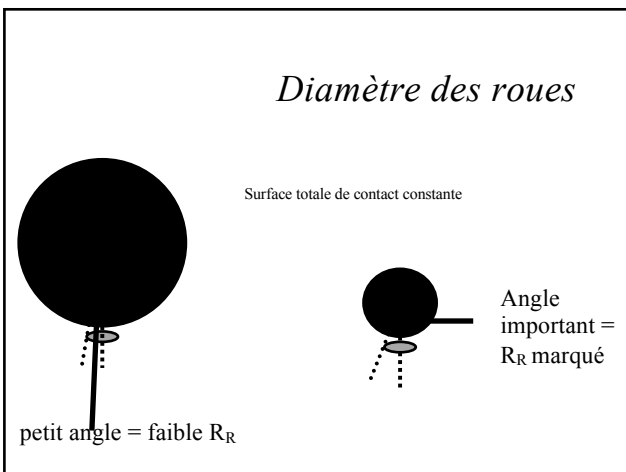


$$R_R = C_R m g$$

$$= C_R F_v$$








Facteurs des résistances de roulement

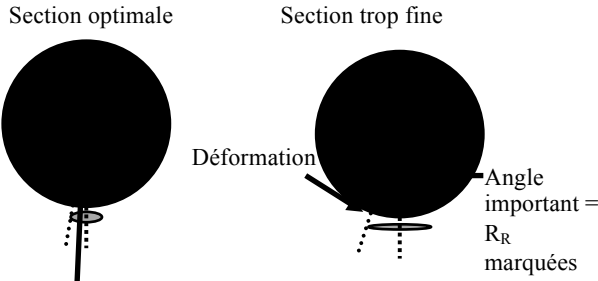
- Vitesse
- Force verticale
- Pression de gonflage
- Diamètres des roues
- Section du pneumatique
- Masse du pneumatique
- Structure du pneumatique
- Nature du revêtement



Surface totale de contact constante

Section du pneu

Section optimale Section trop fine

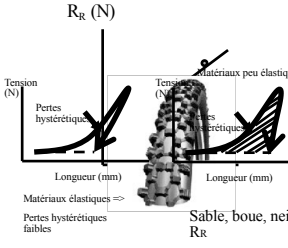


Petit angle = faibles R_R

Angle important = R_R marquées

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

Résistance de roulement (% de la valeur finale)

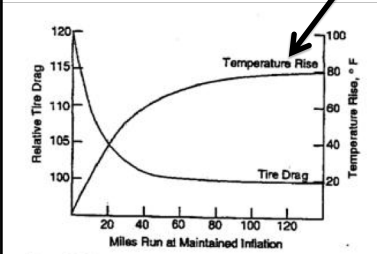
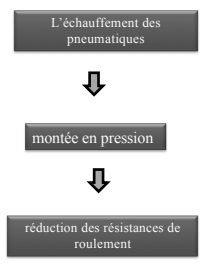
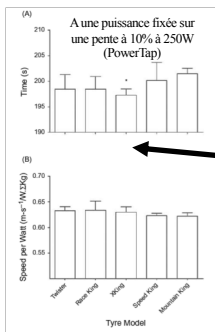


Fig. Relative tire temperature and rolling resistance during warm-up.



Tyre Model	Car at 6.5 or 7 bar (-123 or -101 psi)	Car at 7.5 or 8 bar (-108 or -87 psi)	Rolling Performance at 6.5 or 7 bar	Rolling Performance at 7.5 or 8 bar	Stand Width	Actual Width	Height	Weight	Carcass	Eye Tube	Risk Pressure	Porosity Resistance	Features
http://www.rouesartisanales.com													
Veloflex Carbon	0.0049	0.0050	34.05 Watt	34.74 Watt	22 mm	21.9 mm	20.8 mm	268 g	Cotton Polyester	Latex	8.8 bar 116-131 psi	Low	Very Good
Commissaires Route du Nord	0.0050	0.0053	34.74 Watt	36.63 Watt	24 mm	23.7 mm	22.2 mm	285 g	Cotton Polyester	Latex	7.8 bar 101-116 psi	Low	Okay
Commissaires Platinum	0.0053	0.0059	36.83 Watt	38.91 Watt	21.5 mm	21.5 mm	20.7 mm	266 g	Cotton Polyester	Latex	8.9 bar 116-131 psi	Okay	Okay
Micras Corsa Evo CX	0.0054	0.0055	37.52 Watt	38.22 Watt	21 mm	21.1 mm	19.8 mm	271 g	Cotton Polyester	Latex	9.14 bar 116-203 psi	Okay	Okay
Micras Corsa Evo XS	0.0057	0.0059	38.61 Watt	41.00 Watt	21 mm	21.2 mm	20.0 mm	274 g	Cotton Polyester	Latex	9.14 bar 116-203 psi	Low	Okay

En VTT et en côte



- une masse faible
- Petite bande de roulement
- Faible hauteur de crampons

Le meilleur Xing sur surface dure

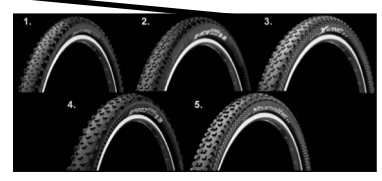


Figure 4. Mean ± 1 data for (A) time taken to complete the climb and (B) average speed (m s⁻¹) per Watt. Macdermid et al., 2015

Résistance de friction ski-neige

Tribomètre (du Grec tribô = frottement) de 23 m à Innsbruck
 → mesures des coefficient de friction dynamique et statique



TS4 Pomoca, 2016

La glisse



<http://guzzigazz.tumblr.com/>

TS4 Pomoca, 2016

Peau	Groupe	Force de frottement (kcal/h)		
		Température		
		-2°C	-5°C	-20°C
Colltex - PDG	Race	143	174	200
POMOCA - Race		164	220	253
Colltex - PDG Black		162	206	220
Contour - Race	Race	137	173	200
POMOCA - Race Pro Grip		136	190	250
POMOCA - Race Pro 2.0		115	156	227
POMOCA - Climb Pro Mohair	Mohair	154	189	232
Colltex - Extreme		197	235	280
Kohla - Evolution 100% Mohair		154	210	225
Contour - Guide	Mohair	143	186	226
Gecko - Standard		149	209	253
G3 - Momix		210	206	257
POMOCA - Climb 2.0	Mix	183	197	252
Colltex - Mix		179	215	237
Montana - Montamix		170	229	276
Contour - Easy	Mix	185	247	290
BD - GlideLite Mohair Mix		163	217	279
Kohla - Peak Mix/Mohair		143	217	257
POMOCA - Climb Pro S-Glide	Mix	144	202	285

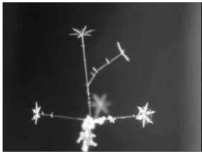
Glisse des peaux de phoque

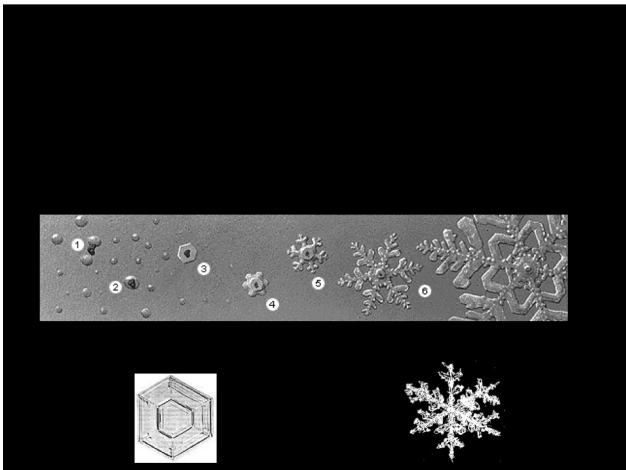
Mohair ou synthétique ?

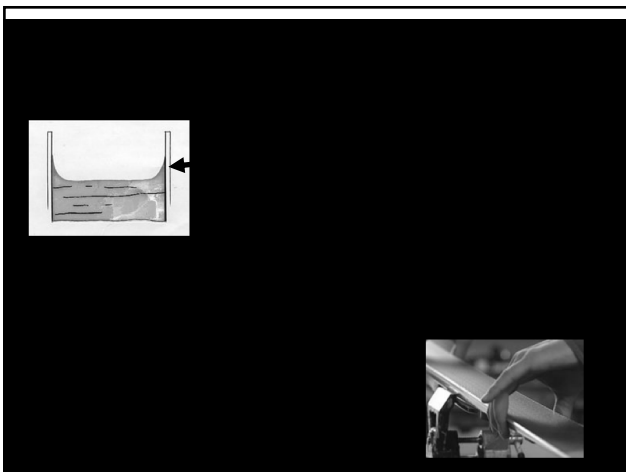
Autres locomotions appareillées

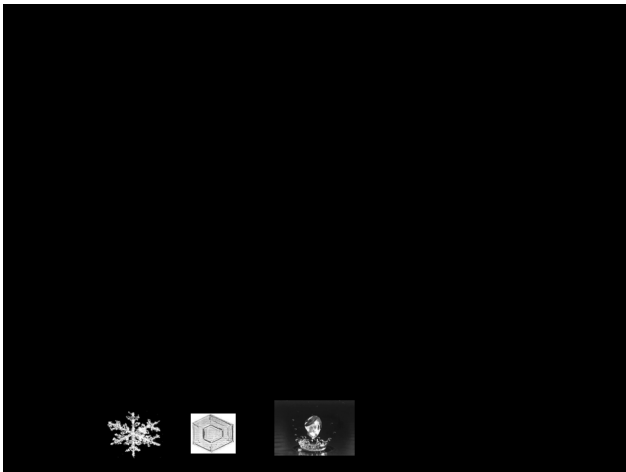
3 grands types d'interface entre le ski ou le patin et le sol :

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










Métamorphose de la neige

- 1969-70 → 32 m de neige cumulée à l'Alpe d'Huez
- 8 m tassés


↓

Transformation des couches de neiges en fonction de la température et du poids de la neige.

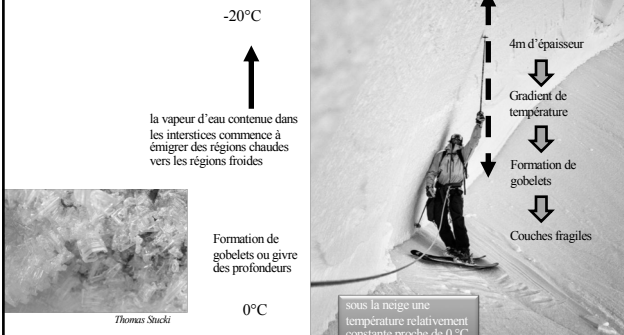


Instabilité du manteau neigeux

- Poids du manteaux neigeux
- Sous couche instable,
- Plaque à vent friable et montée sur coussins d'air
- Gobelets sans cohésion suite à un gradient de température important,
- Grains ronds ou fins,



Gradient de température



Visière intégrée au casque goutte d'eau++

Epaules et bras avec rugosités ++

Mains resserrées, +- poignets verticaux -

Cuisses lisses -

Doigt lisse, +- poignet horizontal ++

- Soufflerie
- Dynamométrie
 - Traction
 - En locomotion réelle
- Décélération

Méthodes de mesure des résistances

Soufflerie

Crouch et al., 2017

56m

11m

Turning vanes & diffuser

Return section

Collector

Open-jet test section & turntable


Nozzle exit

Contraction


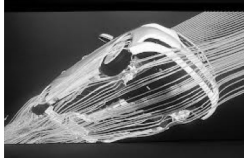
Flow conditioning (mesh, screens, splitters)

Axial flow fans


Avantage / inconvénient



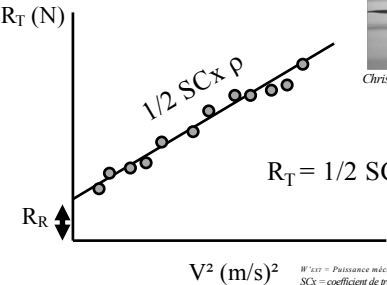
- Conditions standardisées
- Grande précision et reproductibilité
- Interaction sol - véhicule
- Mesure statique (pas de traînée de ventilation ni de mouvement de pédalage)

Méthode par traction




Christopher Froome à 90 km/h sur le Tour de France



$R_T = 1/2 SCx \rho V^2 + R_R$

$W_{EXT} =$ Puissance mécanique, $V =$ vitesse moyenne maintenue, $R =$ résistance totale, $SCx =$ coefficient de traînée aérodynamique, $\rho =$ densité de l'air, $C_R =$ coefficient de roulement, $m =$ masse totale, $g =$ gravité

Méthode simplifiée en situation réelle



Une mesure de puissance à 50 km/h en position aérodynamique : 400 W. A partir du calcul des forces en présence et en fixant ou en connaissant le coefficient de roulement (0,005 sur un bon bitume), il est possible de déterminer le coefficient de traînée aérodynamique chez un cycliste de 70 kg tout équipé et qui roule à une altitude de bord de mer :

$$W_{EXT}/V = R_f = 1/2 SCx \rho V^2 + C_R m g$$

$$400 / (50/3,6) = 1/2 SCx 1,22 (50/3,6)^2 + 0,005 70 9,81$$

En isolant SCx :

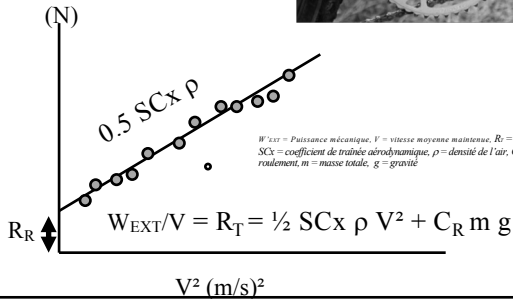
$$(400 / (50/3,6) - 0,005 70 9,81) / (1/2 1,22 (50/3,6)^2) = SCx$$

SCx = 0,22 m²

Possibilité de tester en conditions réelles n'importe quelle position et n'importe quel matériel

Méthode en situation réelle

$$R_T = W_{EXT} / V$$



W_{EXT} = Puissance mécanique, V = vitesse moyenne maintenue, R_T = résistance totale, SCx = coefficient de traînée aérodynamique, ρ = densité de l'air, C_R = coefficient de roulement, m = masse totale, g = gravité



Sur le terrain

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



Méthode de décélération

Principe :

$$\sum F = ma$$

$$R_A + R_R = m a$$

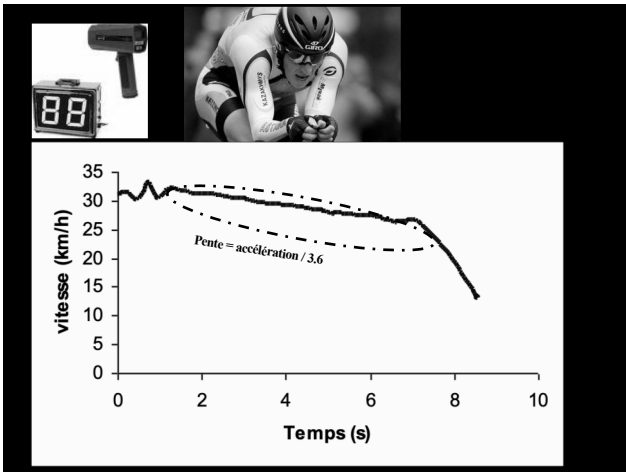
$$R_A + R_R = m \Delta v / \Delta T$$

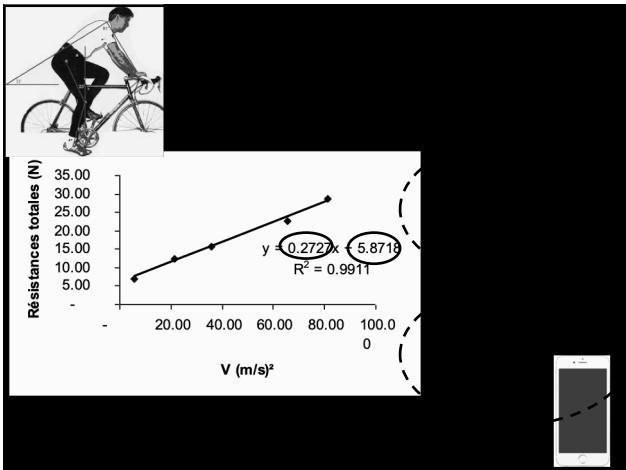
=> il suffit de mesurer la vitesse en fonction du temps

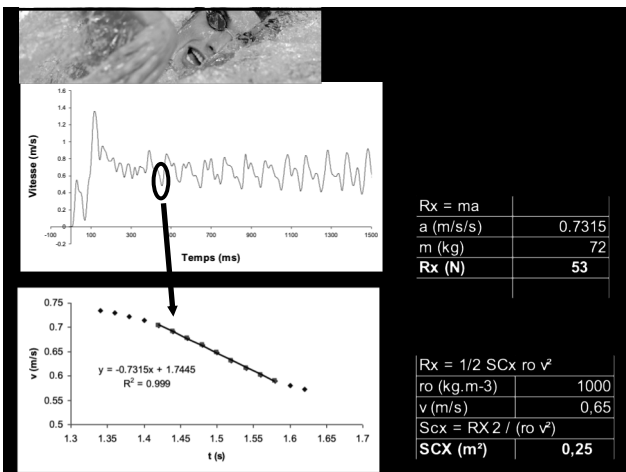


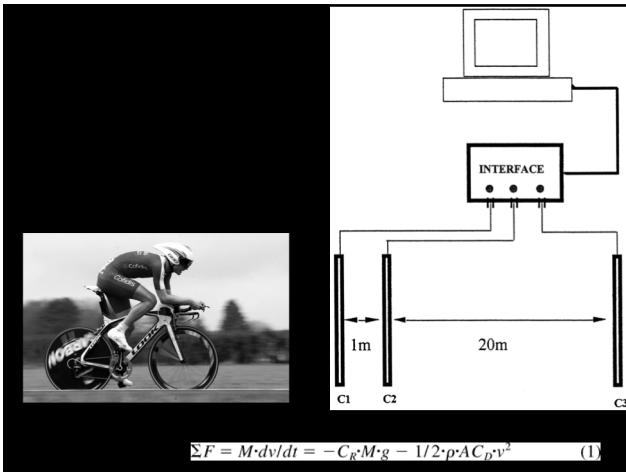
Peter Sagan en Superman ?

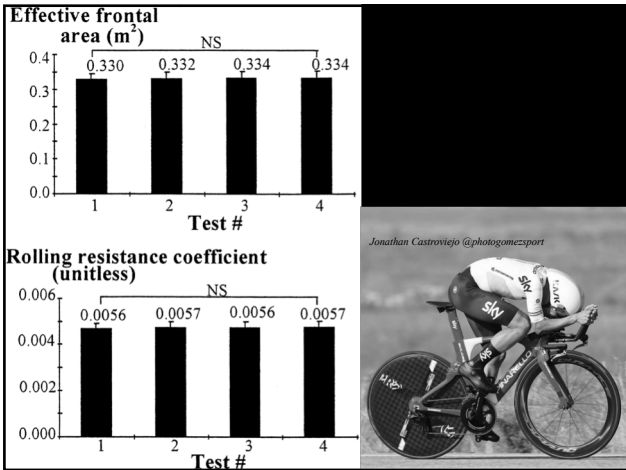
F = Force, R_A = résistances aérodynamiques, R_R = résistance de roulement, m = masse, a = accélération, Δv = variation de vitesse et ΔT = variation de temps

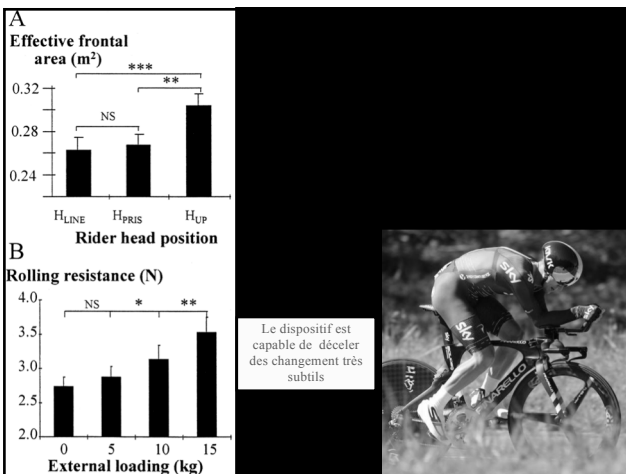


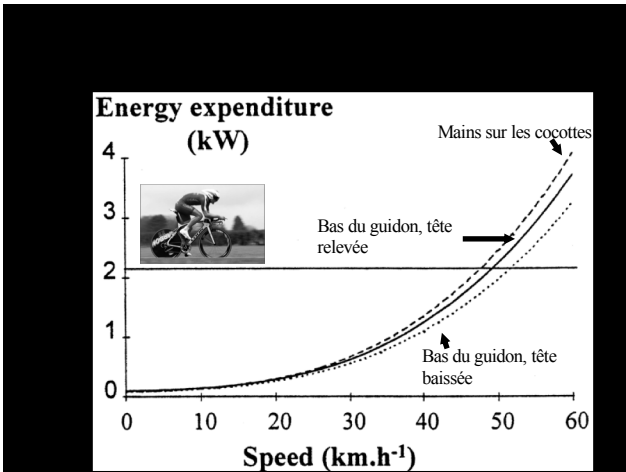








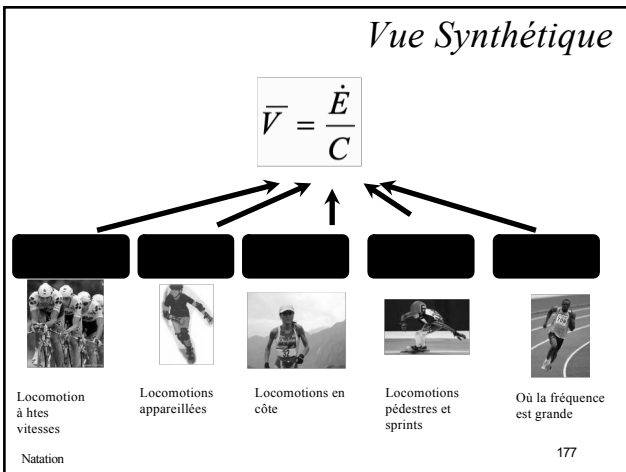




Décélération

Geraint Thomas vainqueur de la 1^{re} étape du Tour de France 2017

- Méthode basée sur les équations de la dynamique à la fois :
 - Rapide à mettre en œuvre et
 - Précise
- Méthode qui permet de déterminer :
 - Les résistances aérodynamiques et de roulement
 - La puissance en fonction de v
 - La puissance explosive ($W'_{\text{explosive}} = m \cdot a \cdot v$)



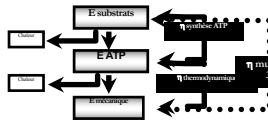
Plan

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



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



Quiz

D'où vient l'énergie utilisée pour la locomotion?

1. Des substrats
2. Des glucides
3. Des lipides
4. De la photosynthèse
5. De l'oxygène



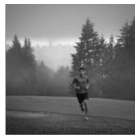
Avec quelle efficacité l'énergie contenue dans les sucres et les graisses est-elle convertie en énergie mécanique?

- 25%
- 50%
- 75%
- 100%

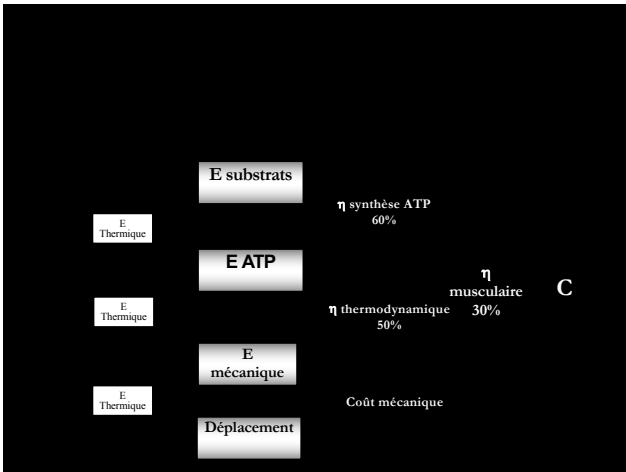


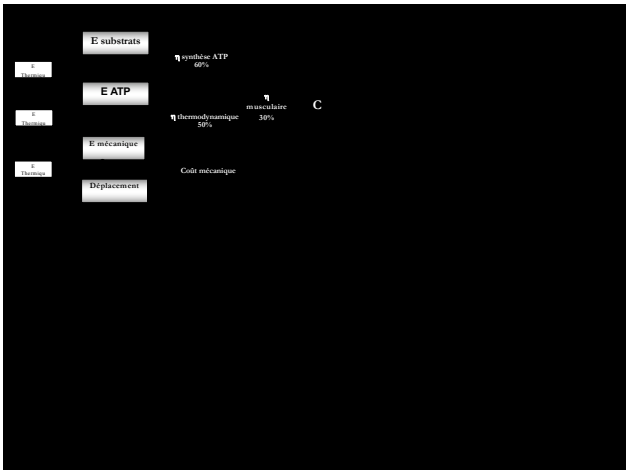
Le rendement de la synthèse d'ATP

- Est indépendant de la présence ou non en oxygène
- Est meilleur pour les lipides
- Est meilleur pour les glucides
- Est extrêmement faible pour le métabolisme anaérobie







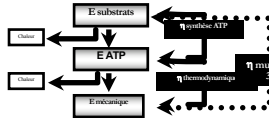


Définitions

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

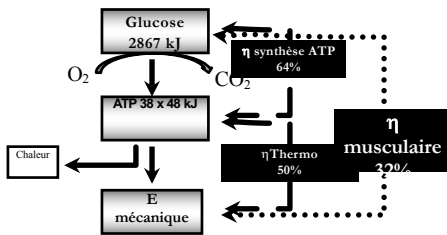
Conversion de l'énergie chimique en mécanique

- 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 :



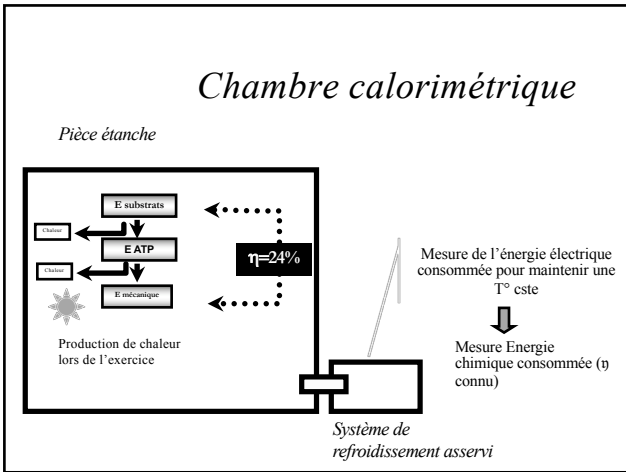
Quantification de l'énergie chimique

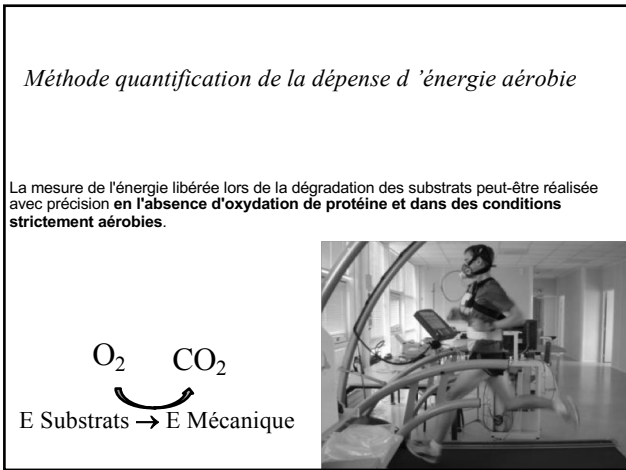
Energie fournie par les substrats

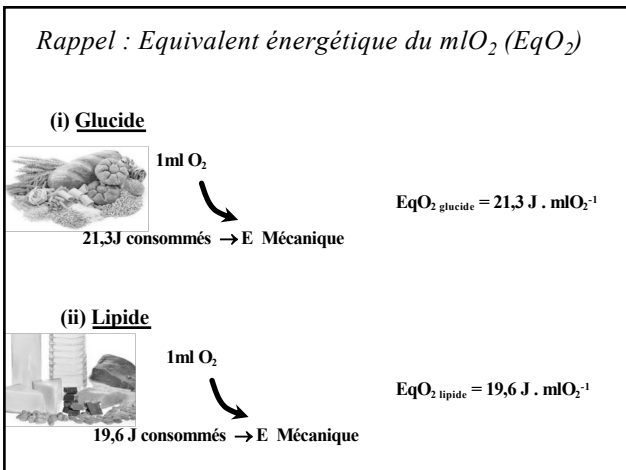
- En condition aérobie
 - Méthode calorimétrique
 - Méthode de thermochimie respiratoire
- En condition anaérobie
 - Méthode directe
 - Méthode du déficit cumulé en O₂
 - Méthode de Margaria
 - Méthode électro myographique

En 12 cours mesg anaérobie









Systèmes portables

O₂ CO₂



O₂ CO₂



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? Le métabolisme de repos étant 5 mlO₂/min/kg

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

Puissance consommée pour se déplacer (Ė) ?



$$\begin{aligned} \dot{E} \text{ (J/min/kg)} &= E_{qO_2} VO_{2net} \\ &= 21.3 \times 50 = 1065 \text{ J/min/kg} \end{aligned}$$

$$\dot{E} \text{ (J/s/kg)} = 1065 / 60 = \underline{17.8 \text{ W/kg}}$$



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?

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

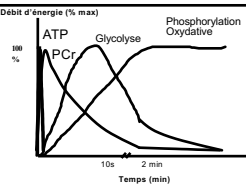
$$= 4,3 / 17,8 = \underline{0,24}$$

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

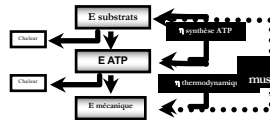
Principe : mesure des variations des concentrations en ATP, Phosphocréatine et glycogène

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

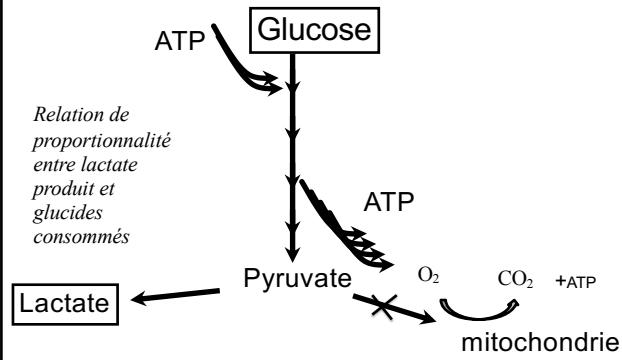


Conversion de l'énergie chimique en mécanique

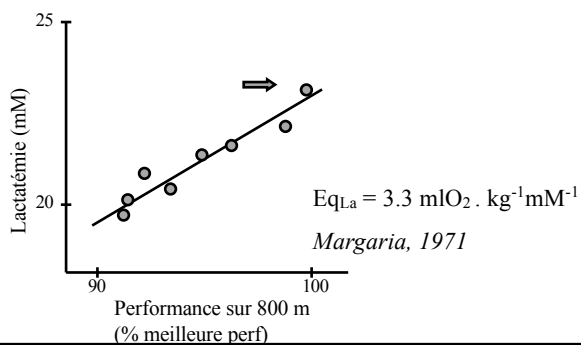
- principes généraux de thermodynamique
- conversion de l'énergie chez l'homme
- définitions
- rendement musculaire
 - Quantification de l'énergie chimique
 - Rendement de la synthèse d'ATP
 - Rendement thermodynamique



Glycolyse



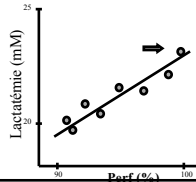
Corrélation lactatémie - performance



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)



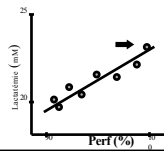
Méthode de Margaria (1971)

$$\dot{E}_{(mlO_2/min/kg)} = (\dot{V}O_2 - \dot{V}O_{2repos}) + (\Delta [la] * Eq_{La}) / T$$

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

(où T= 45 s = 0,75min)

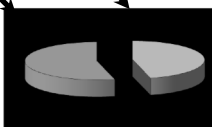
$$= \underline{123 \text{ mlO}_2/\text{min/kg}}$$



Parts aérobie et anaérobie?

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

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 ?

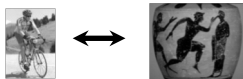
Sachant que la puissance mécanique développée par Collard pour courir à une vitesse de 8,8 m/s est de 20 W/kg, quel est son rendement musculaire ?

$$\eta_{\text{musculaire}} = \frac{\dot{W}_{\text{méca}}}{\dot{E}}$$

$$= 20 / 43.7 = \underline{0.46}$$

Valeur >> au rendement du pédalage !?

Rendement en fonction du régime de contraction



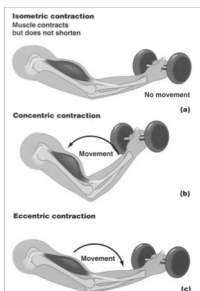
24% vs. 46%

concentrique

Excentrique -
concentrique

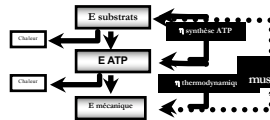
Fin ici le
3/3/20

3 types d'action musculaire :

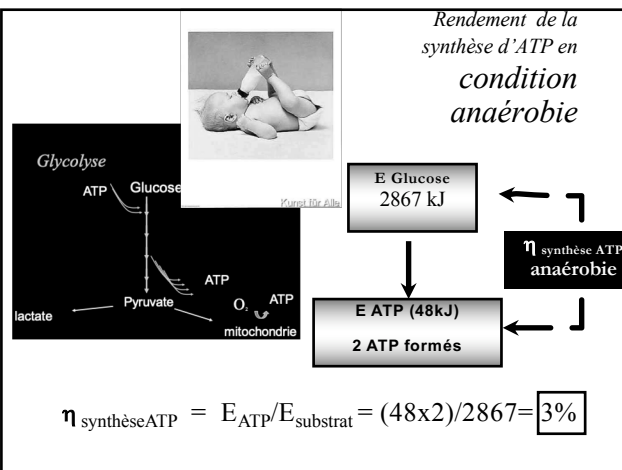


Conversion de l'énergie chimique en mécanique

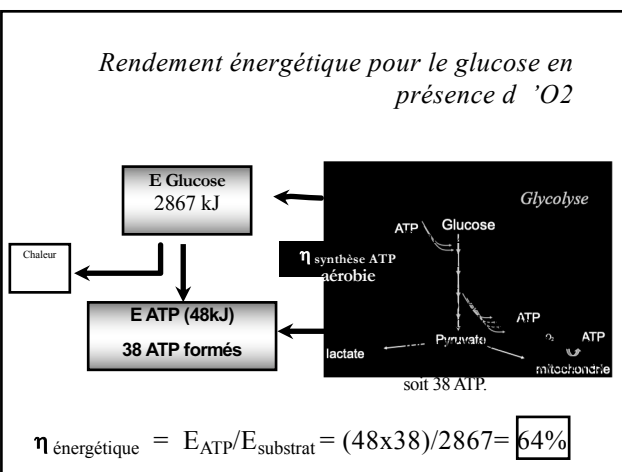
- principes généraux de thermodynamique
- conversion de l'énergie chez l'homme
- définitions
- rendement musculaire
 - Quantification de l'énergie chimique
 - Rendement de la synthèse d'ATP
 - Rendement thermodynamique



Rendement de la synthèse d'ATP en condition anaérobie

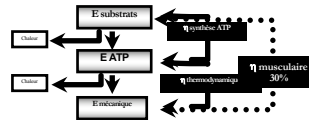


Rendement énergétique pour le glucose en présence d'O₂

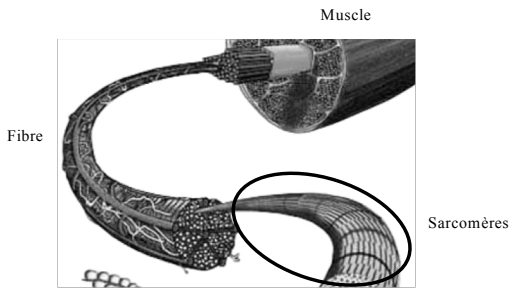


Conversion de l'énergie chimique en mécanique

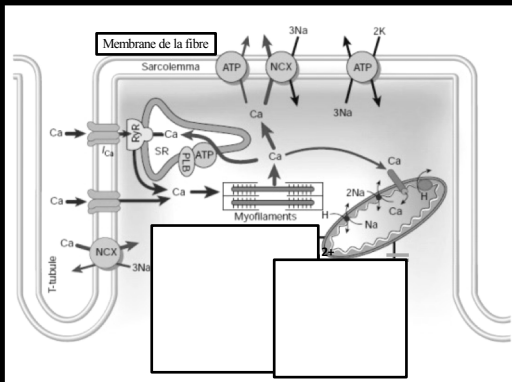
- principes généraux de thermodynamique
- conversion de l'énergie chez l'homme
- définitions
- rendement musculaire
 - Quantification de l'énergie chimique
 - Rendement de la synthèse d'ATP
 - Rendement thermodynamique



Rappel sur l'architecture du muscle

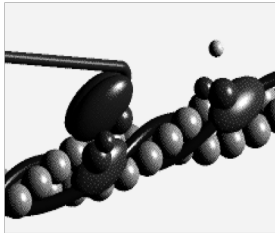


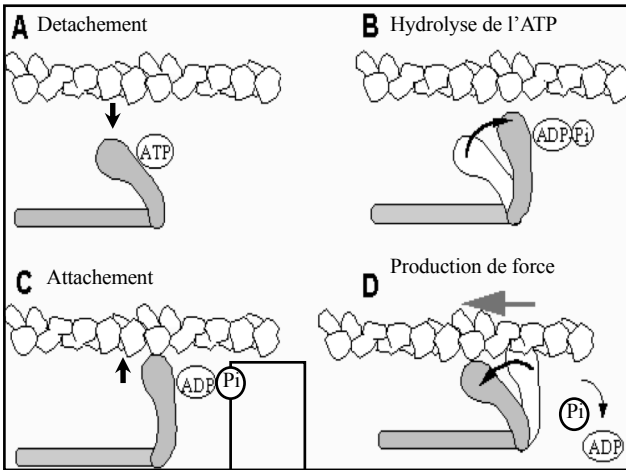
<http://www.artwiredmedia.com/clem/ents/muscleb.jpg>

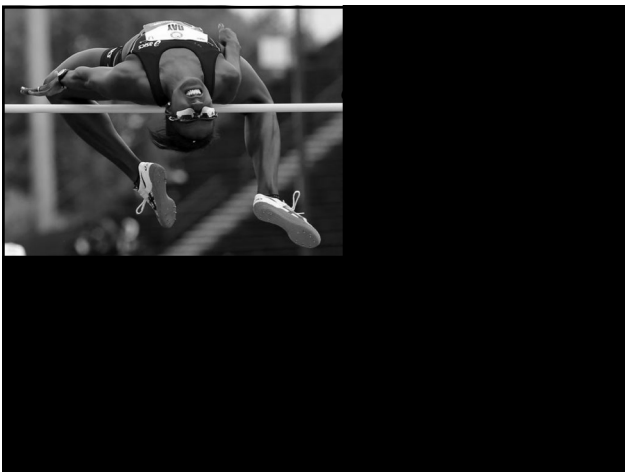


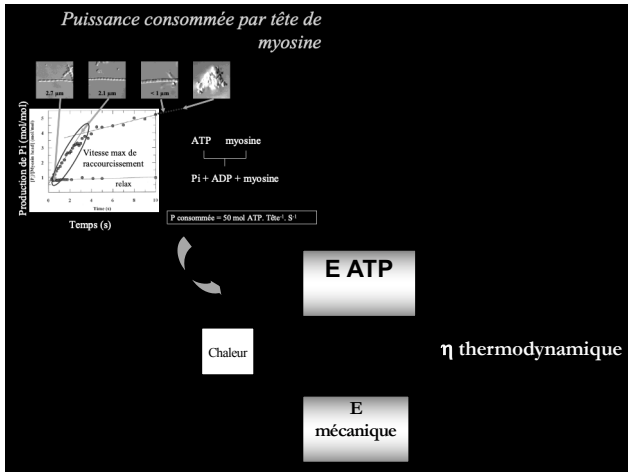
Puissance développée par tête de myosine

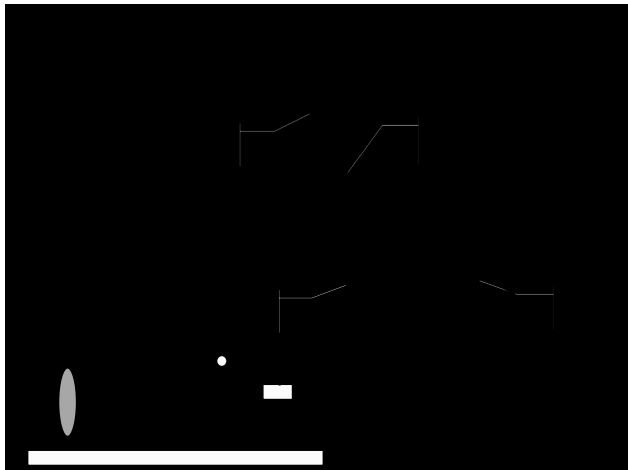
294 têtes de myosine par 1/2 sarcomère

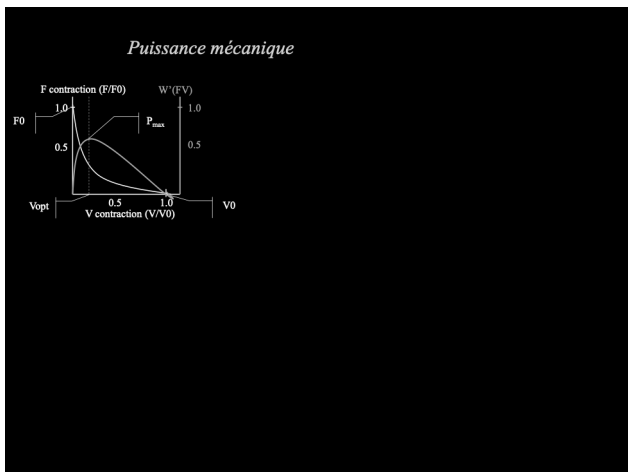


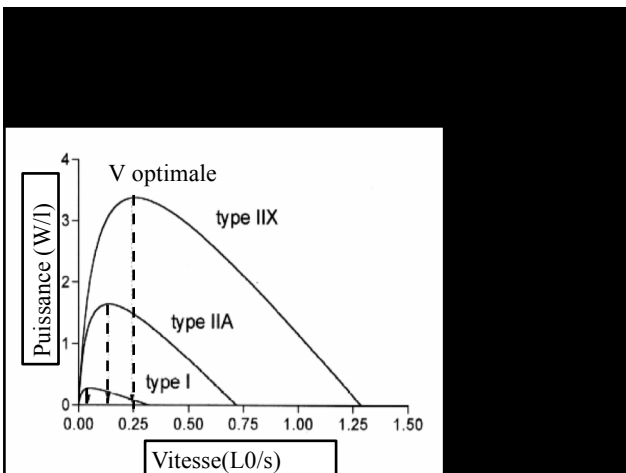











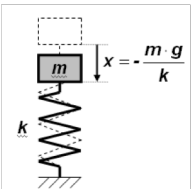


Plan

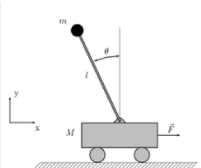
1. Introduction
2. Energie, force, travail, puissance
3. Travail cinétique
4. Travail potentiel
5. Travail interne
6. Travail élastique
7. Travail et fatigue
8. Travail contre les forces de friction (aérodynamique, ...)
9. Conversion Energie chimique en mécanique
10. Paradigmes mécaniques

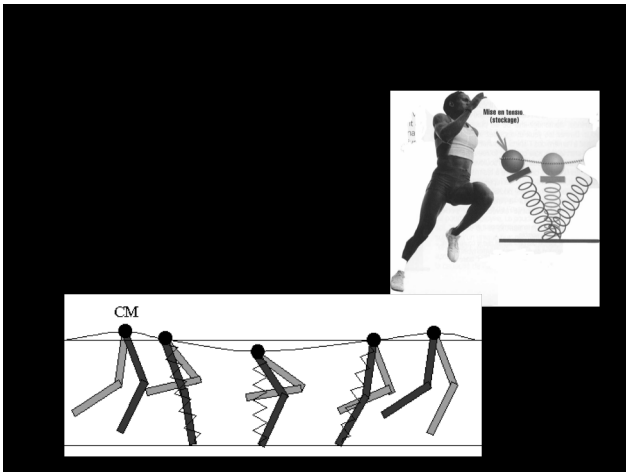


Paradigmes mécaniques



- Modèle masse-ressort
- Modèle du pendule inversé







Lame carbone dans les semelles

Télécharger article records du monde → QCM

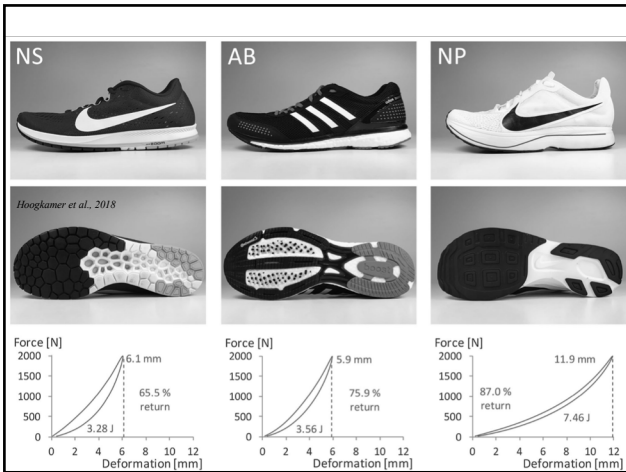
Hoogkamer et al., 2018

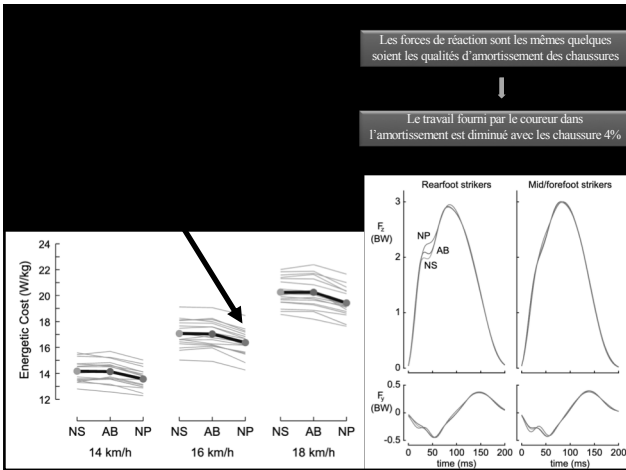
Foam
Plate
Foam
Rubber Outsole

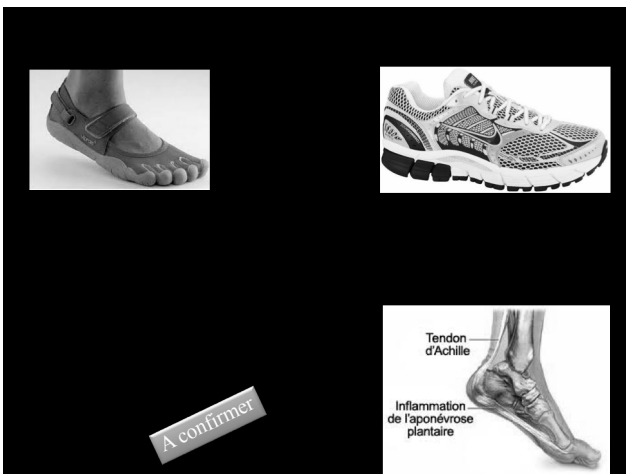
Force 2000N
Time 185ms
Instron
Actuator
Load Cell

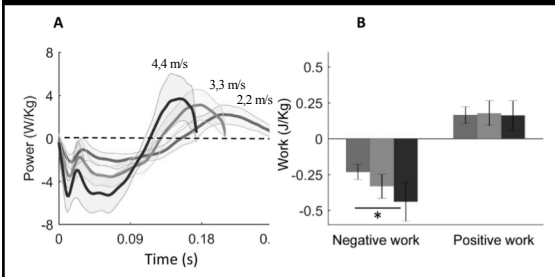
Fig 1 Exploded view of the Nike prototype shoe that incorporates a newly developed midsole material and a full-length carbon-fiber plate with forefoot curvature, embedded in the midsole

Fig 2 A rigid foot-form (shoe last) was mounted to the material testing machine actuator and snugly fit into a fully-constructed shoe. The actuated foot-form compressed the midsole in the vertical direction to match the displayed general time history of the vertical ground reaction force, producing insole pressure patterns similar to those recorded during running at 18 km/h.









Si l'on accroît ou décroît la fréquence de forçage, on augmente alors la dépense d'énergie et on vérifie effectivement le phénomène de résonance.

Rappel : Fréquence naturelle

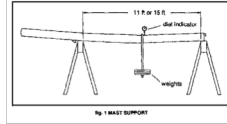
La fréquence naturelle d'un système oscillant simple dépend de sa raideur (k), sa masse (m) :

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Il existe une fréquence d'enjambée qui optimise le travail élastique et diminue la dépense énergétique

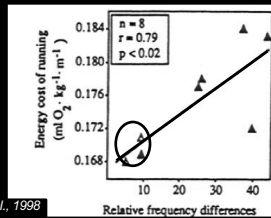
Définitions

- La raideur est définie comme une résistance à la déformation : $k = \Delta F / \Delta x$

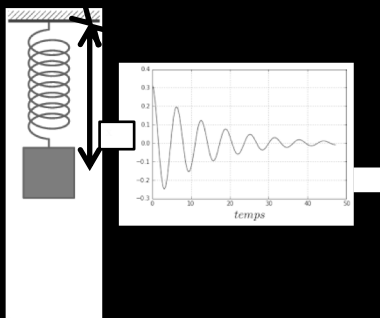


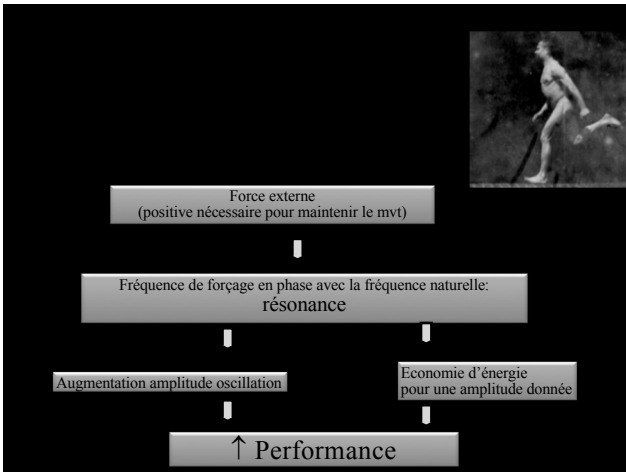
- L'amortissement comme une dissipation de force en fonction de la vitesse

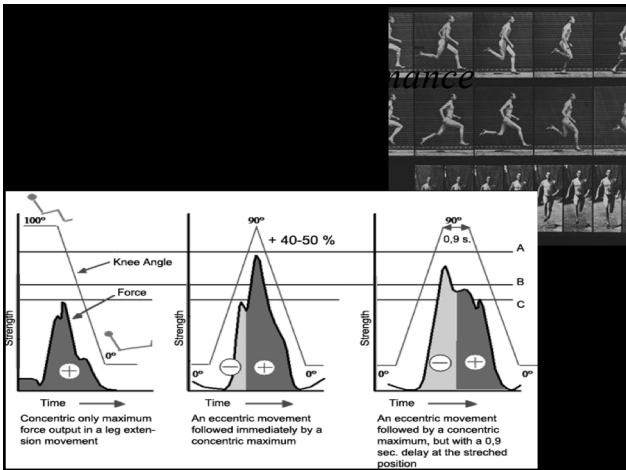


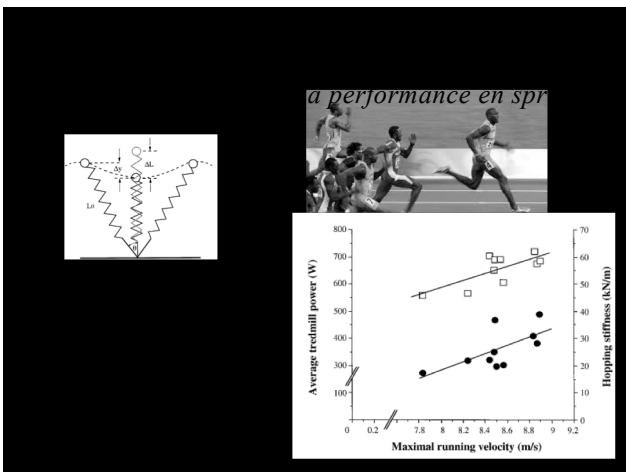


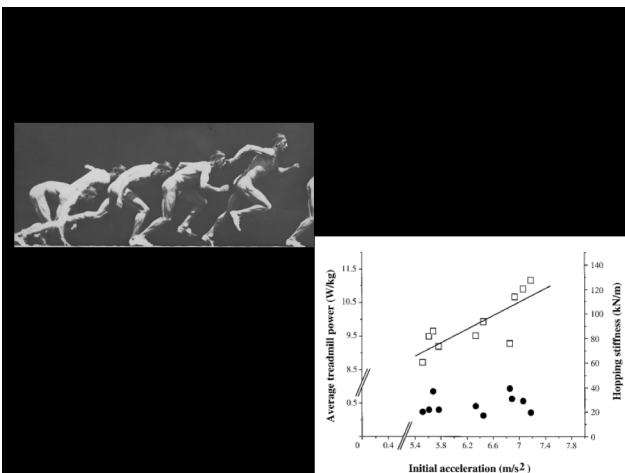
Dalleau et al., 1998

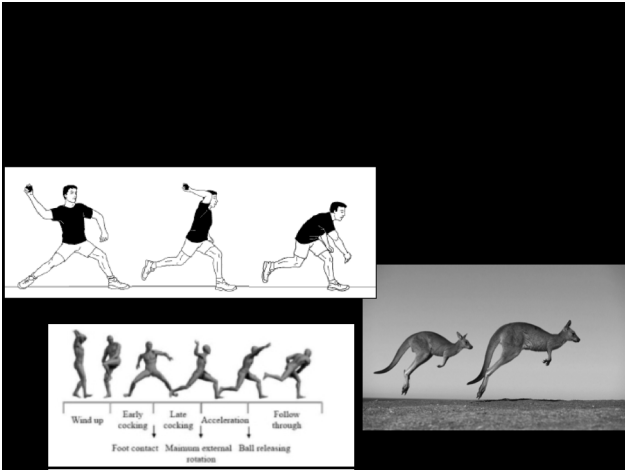


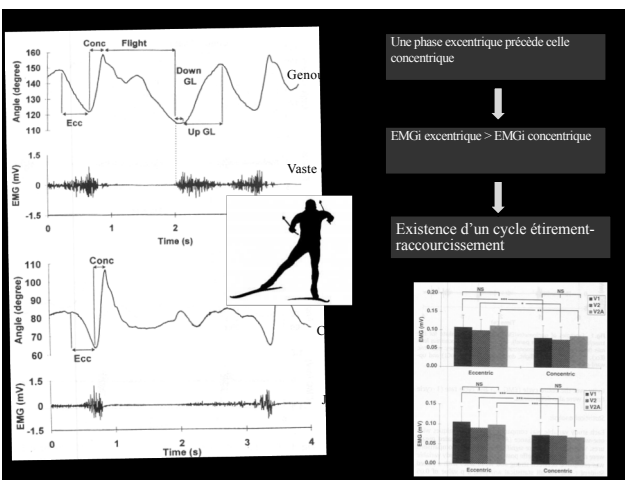










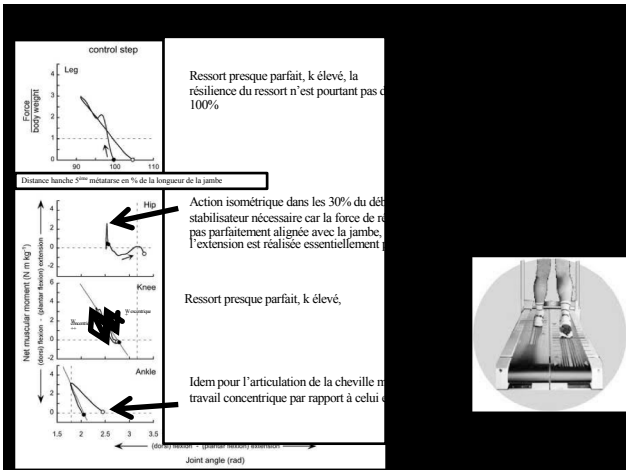


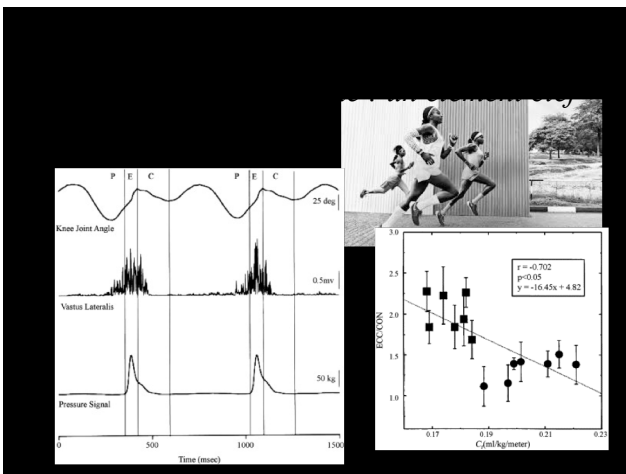
Ajustement de la raideur

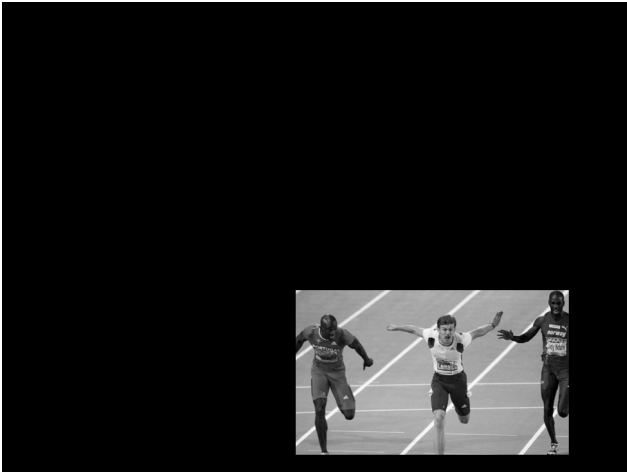


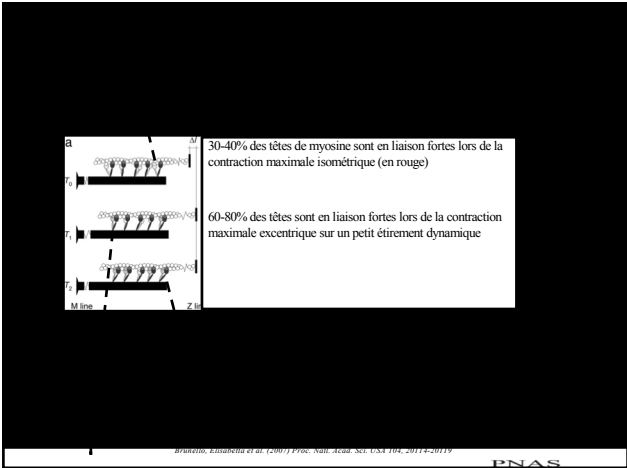
Lorsque les conditions de courses changent → la raideur et les angles de flexion-extension changent :

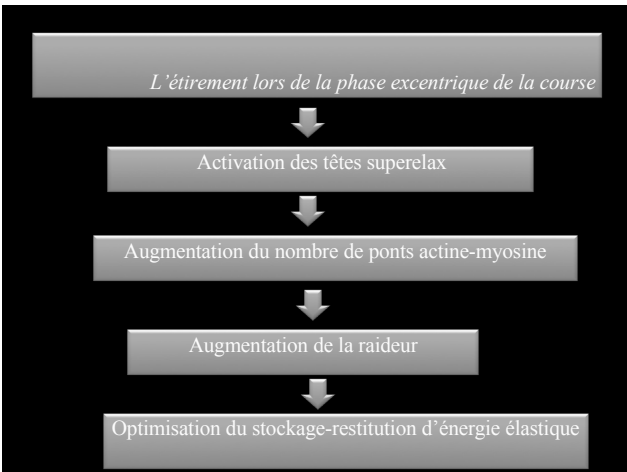
- Si la fréquence augmente → la raideur augmente et les angles de flexion-extension diminuent (Farley and Gonzalez, 1996)
- Course en terrain naturel instable → ajustement de la raideur (Seyfarth et al., 2002; Grimmer et al., 2008)
- Sur surfaces plus ou moins molles, la raideur est modulée (Ferris et al., 1999; Ferris et al., 1998)

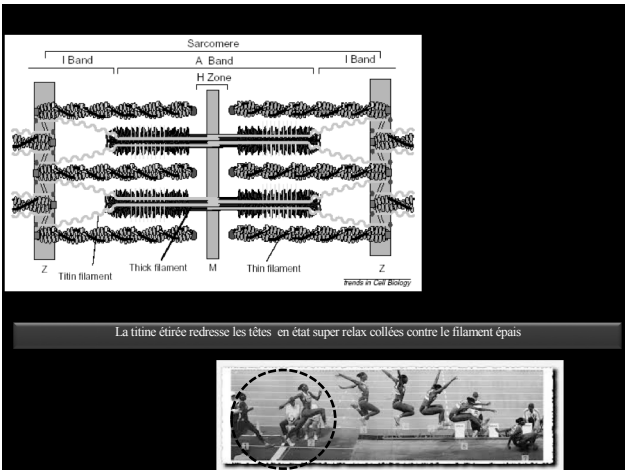


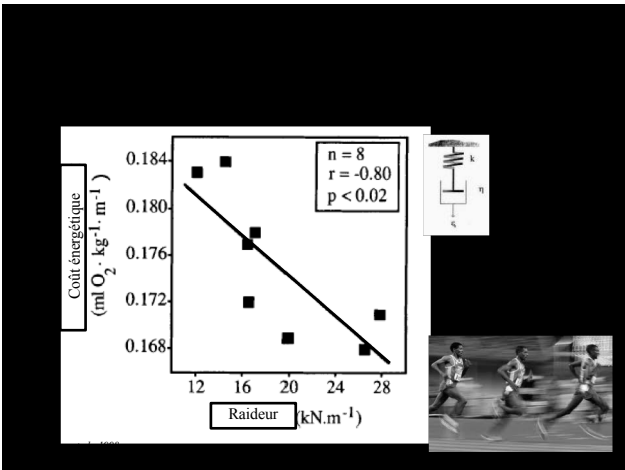


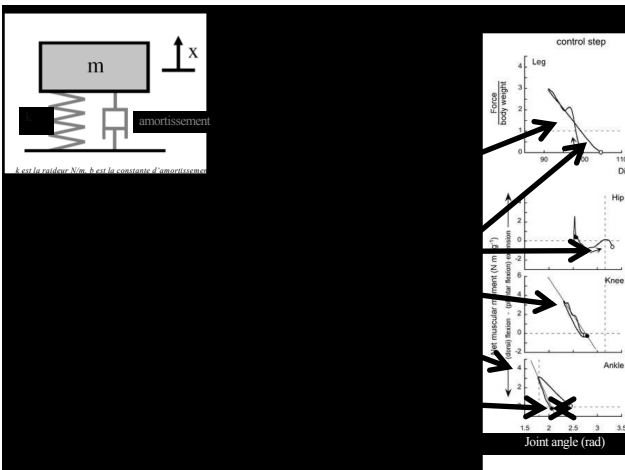


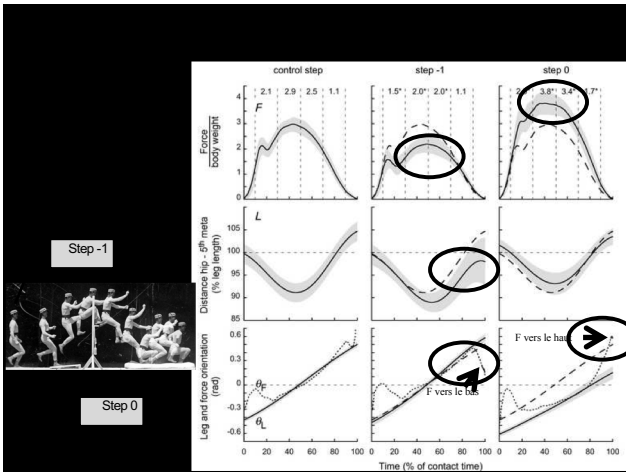


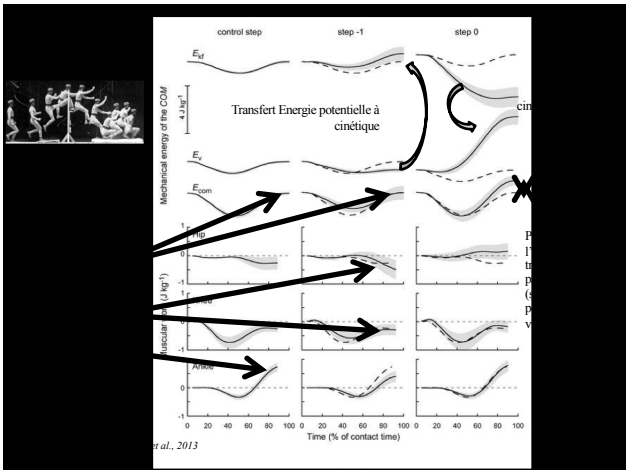


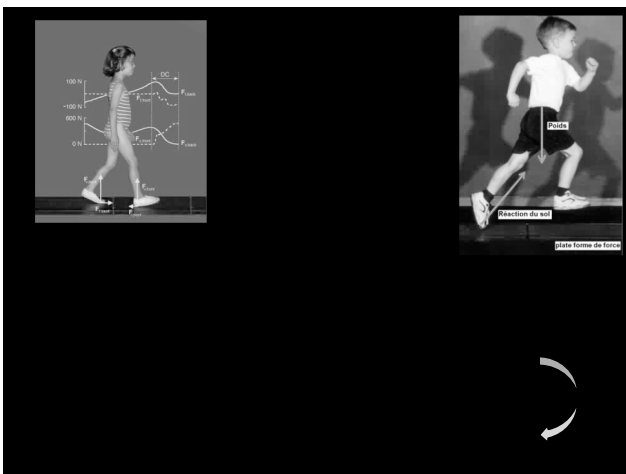


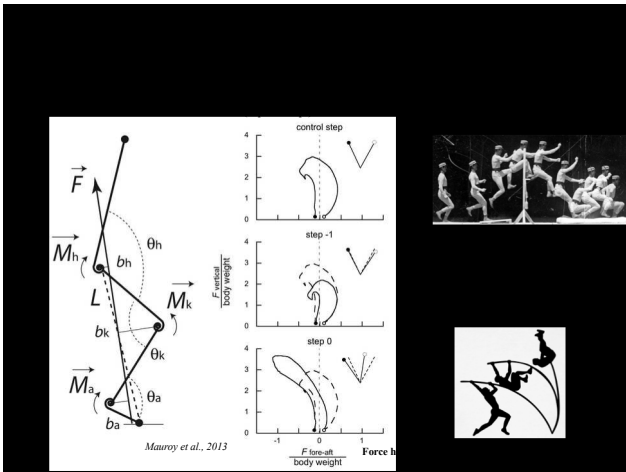


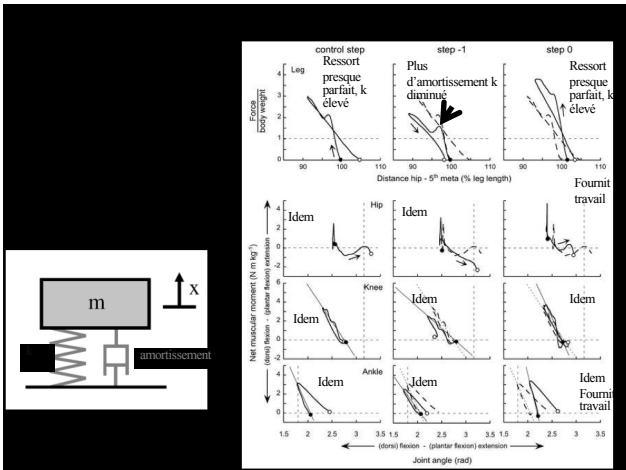




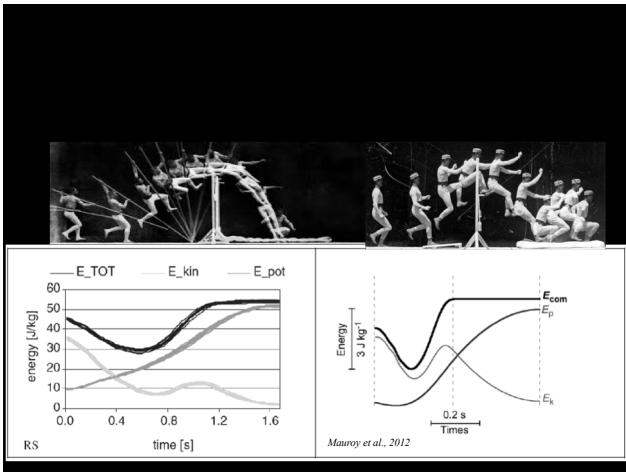


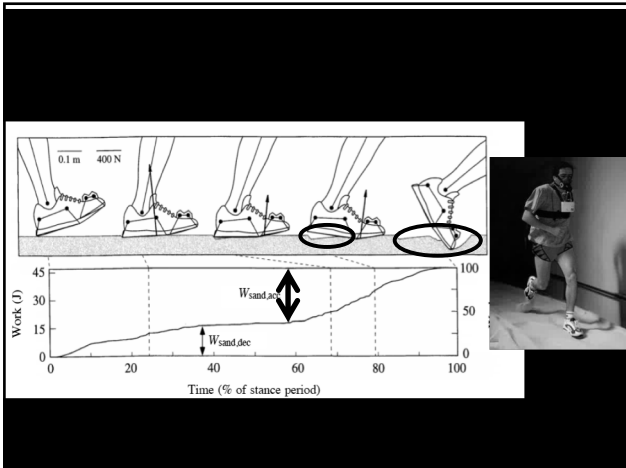




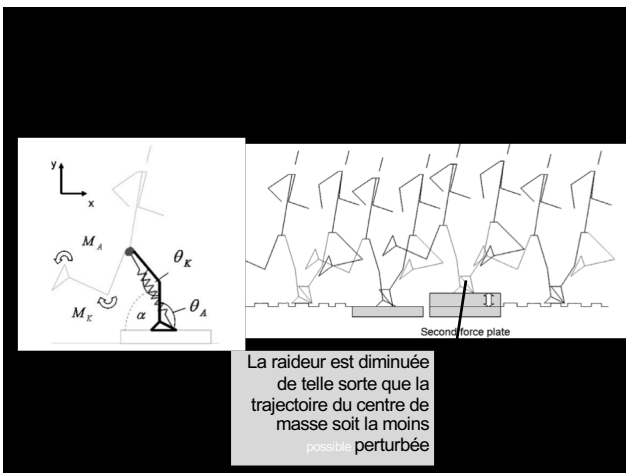


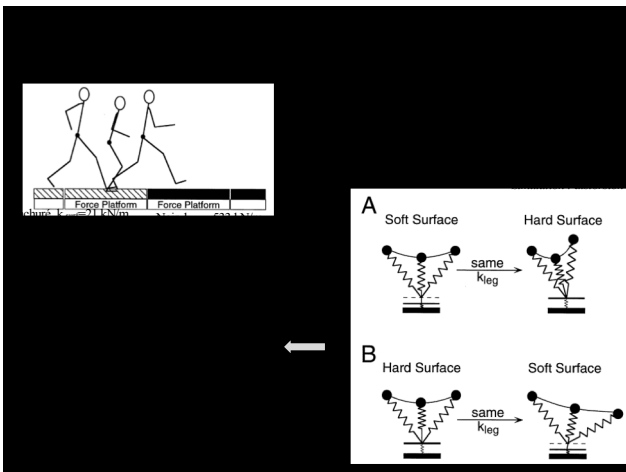


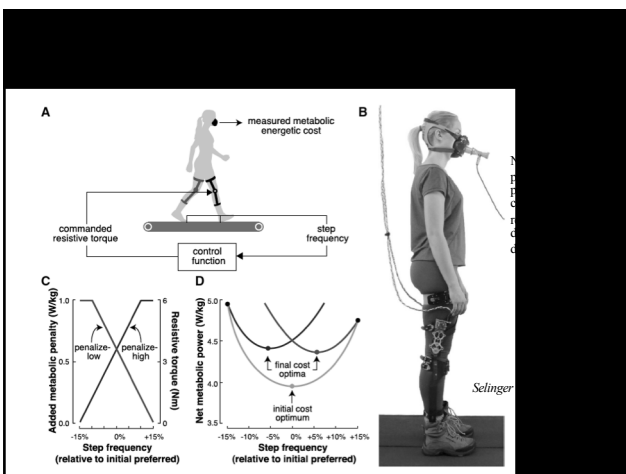


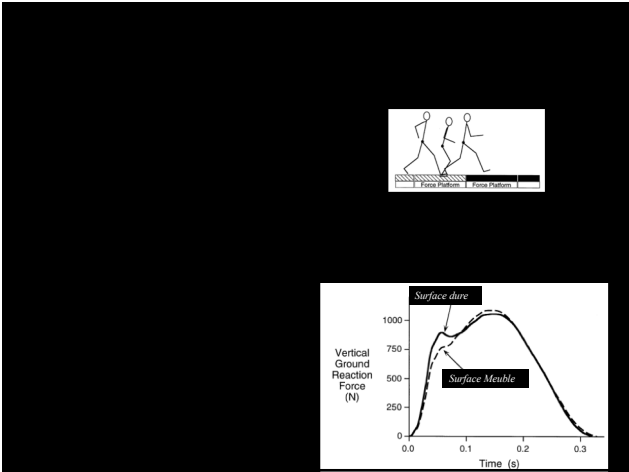


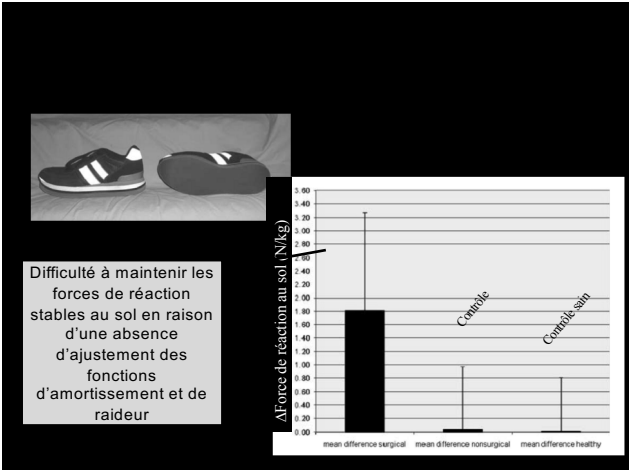




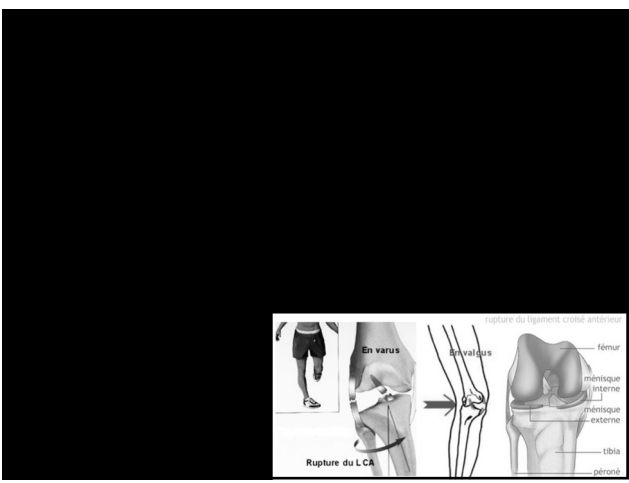


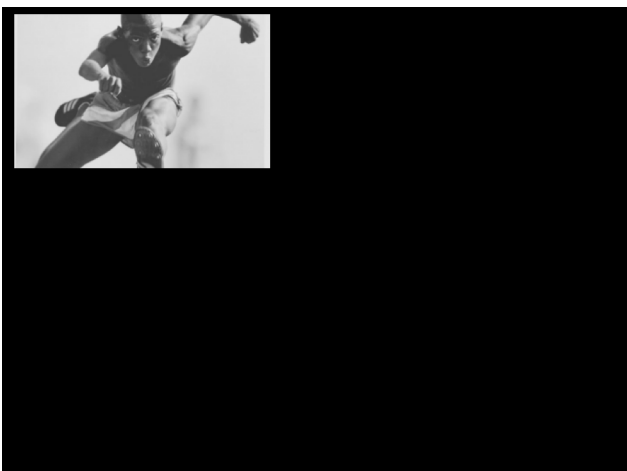


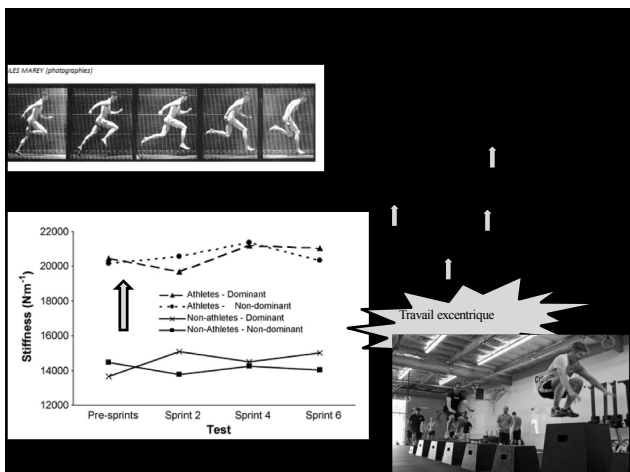


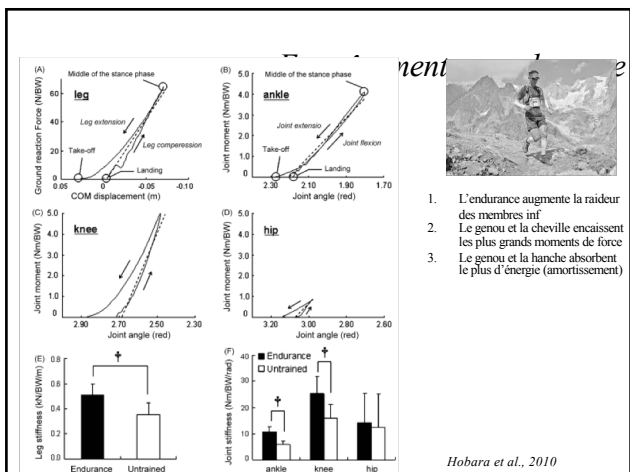


Difficulté à maintenir les forces de réaction stables au sol en raison d'une absence d'ajustement des fonctions d'amortissement et de raideur





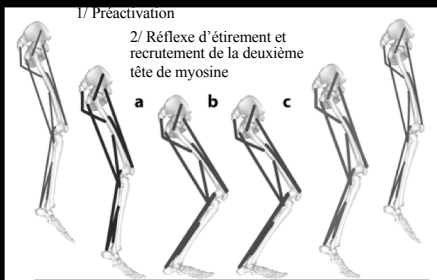




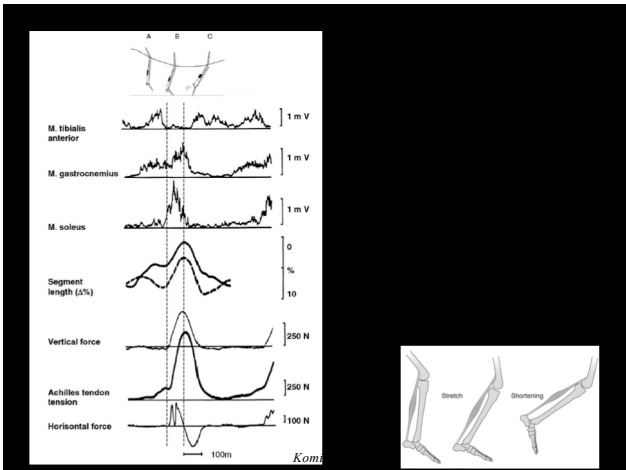
ment

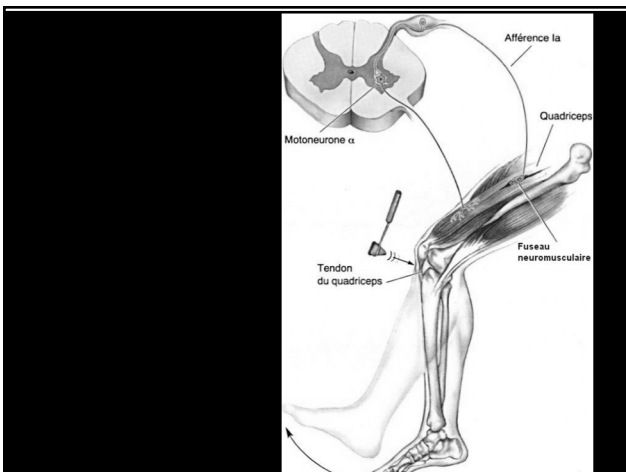


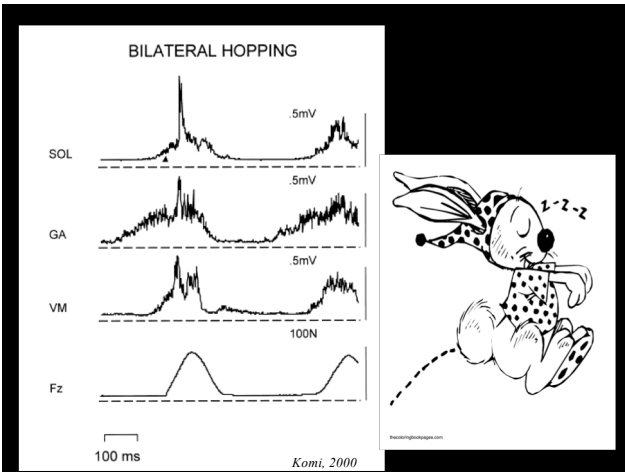
1. L'endurance augmente la raideur des membres inf.
2. Le genou et la cheville encaissent les plus grands moments de force
3. Le genou et la hanche absorbent le plus d'énergie (amortissement)

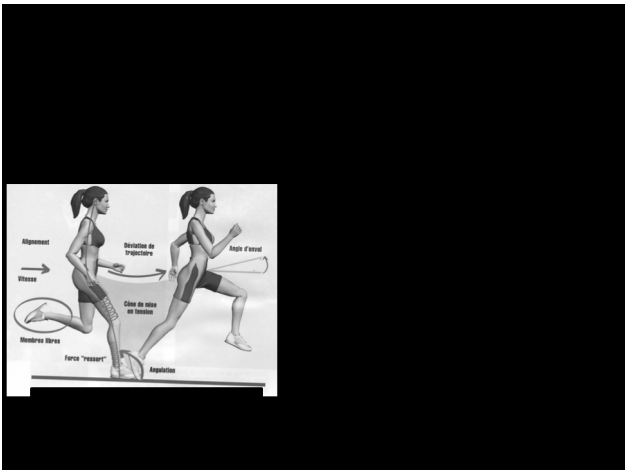


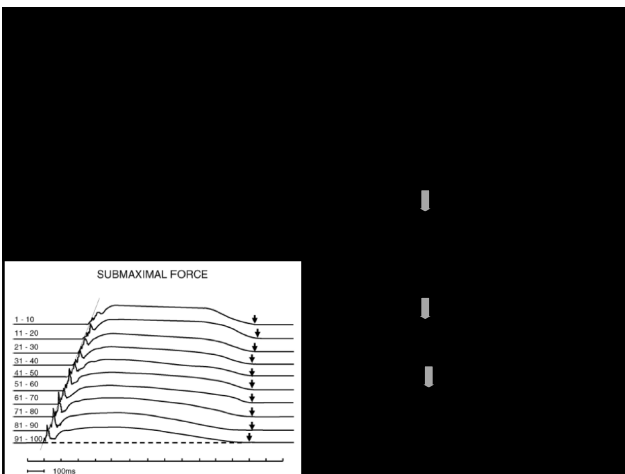
Neptune RR, et al. 2009.
Annu. Rev. Biomed. Eng. 11:81-107

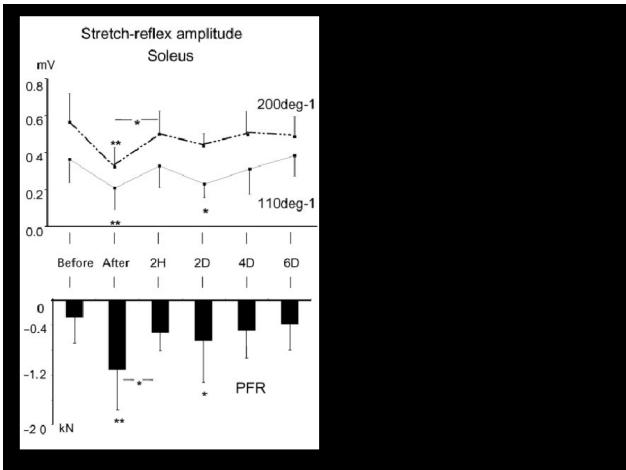


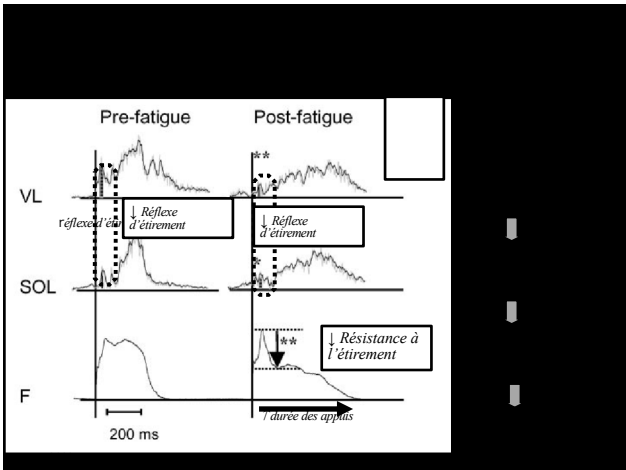


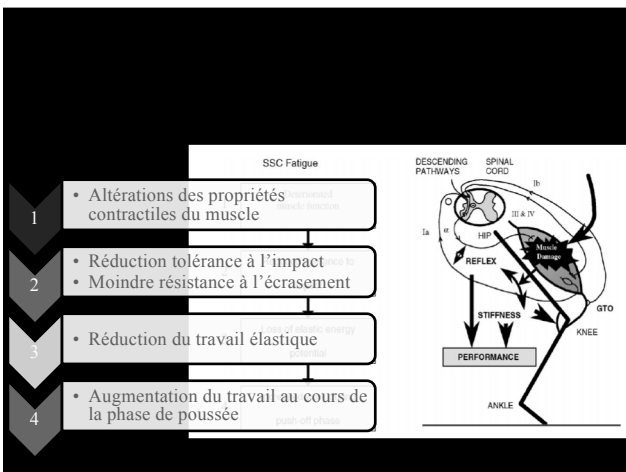


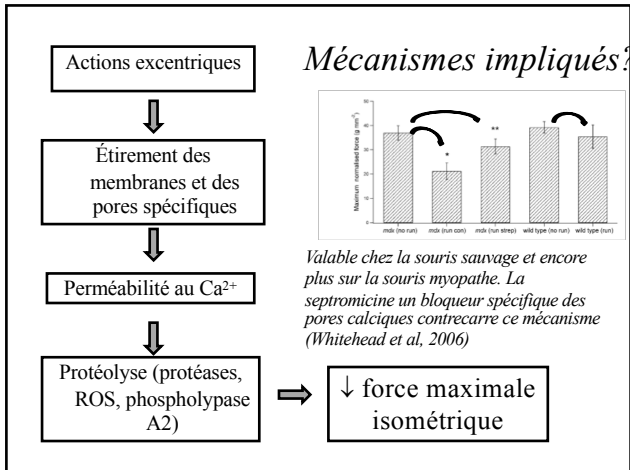


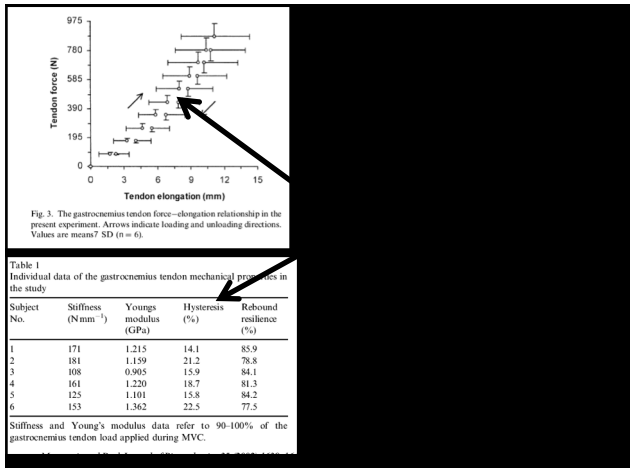


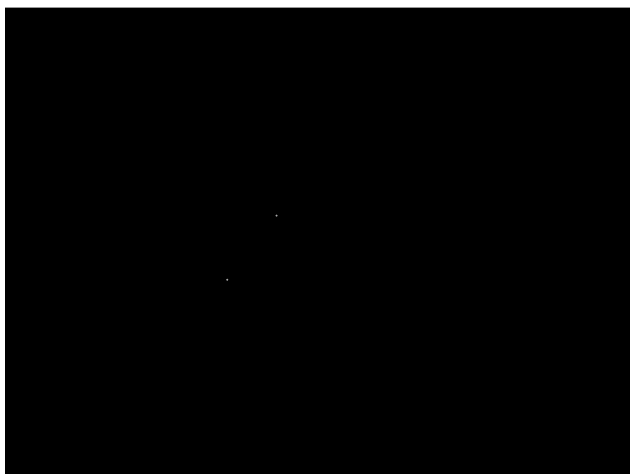


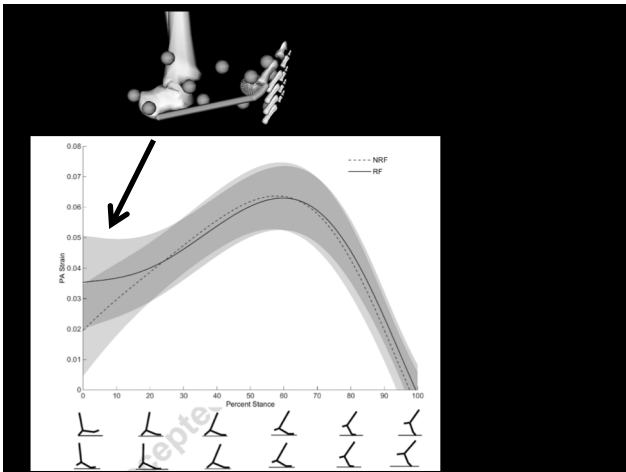












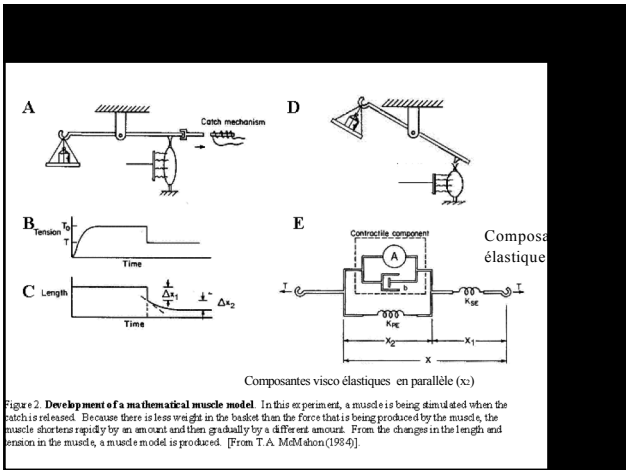
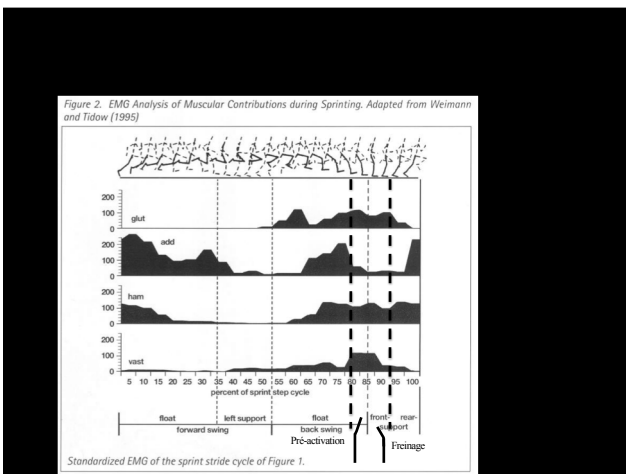
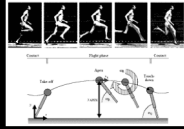


Figure 2. Development of a mathematical muscle model. In this experiment, a muscle is being simulated when the catch is released. Because there is less weight in the basket than the force that is being produced by the muscle, the muscle stretches rapidly by an amount and then gradually by a different amount. From the changes in the length and tension in the muscle, a model is produced. [From T. A. McMahon (1984)].







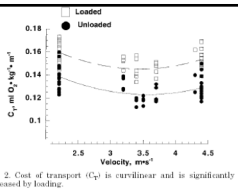
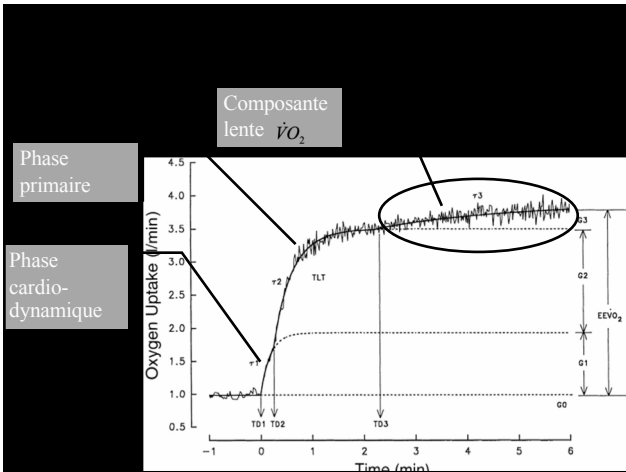




Fig. 2. Cost of transport (C_{OT}) is curvilinear and is significantly increased by loading.



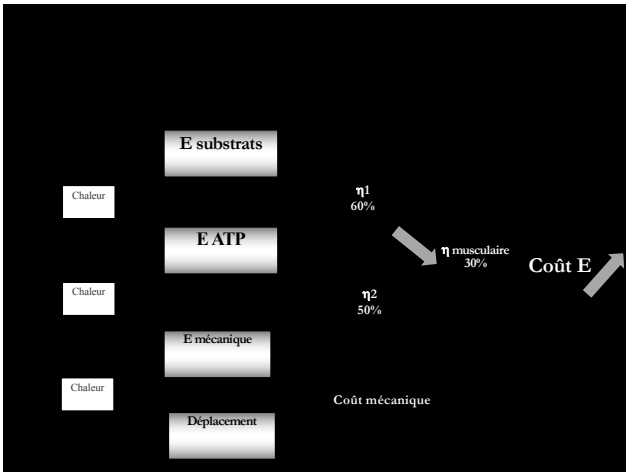
$$\bar{V} = \frac{\dot{E}}{C}$$

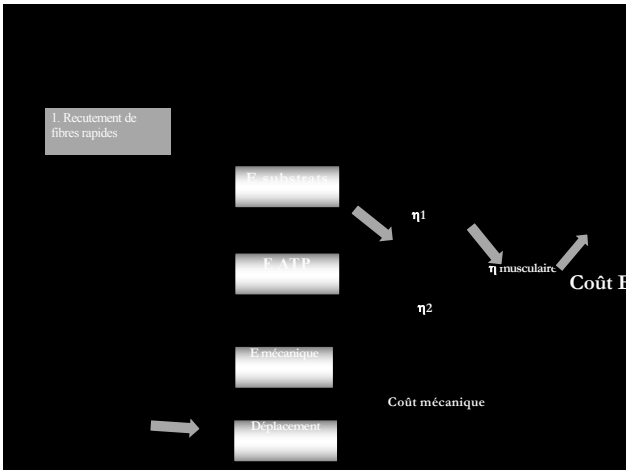
$$\bar{V} = \frac{\dot{V}O_2 - \dot{V}O_{2repos}}{C}$$


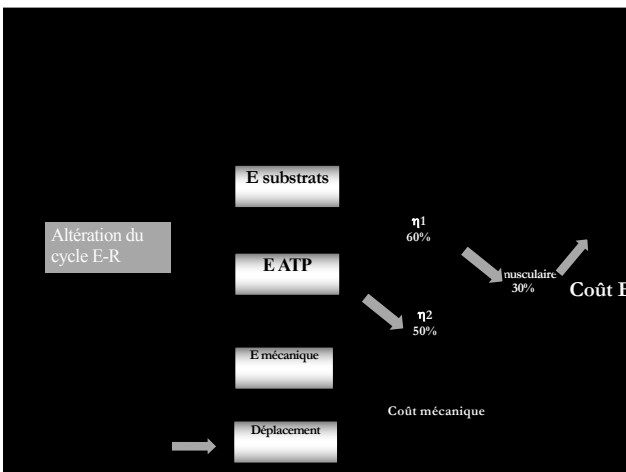
$$C = \frac{\dot{V}O_2 - \dot{V}O_{2repos}}{\bar{V}}$$

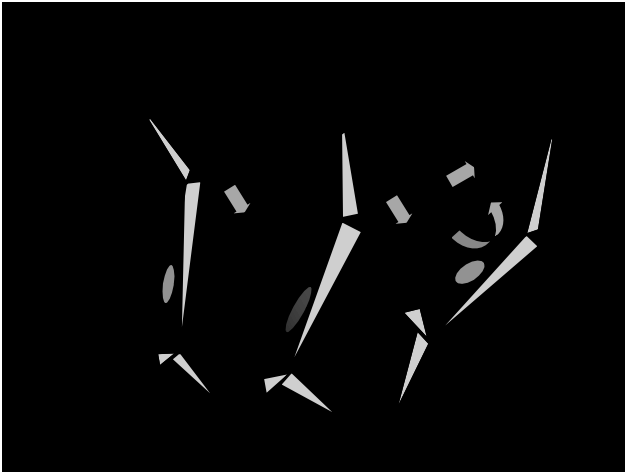
$$\eta = \frac{Pméca}{\dot{E}}$$


$$\eta = \frac{Pméca}{\dot{V}O_2 - \dot{V}O_{2repos}}$$





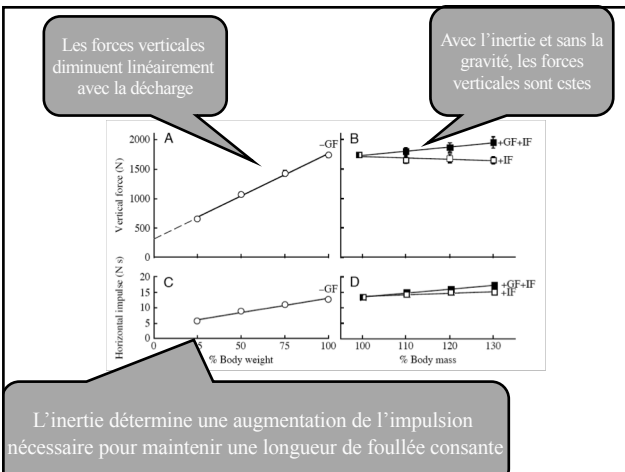


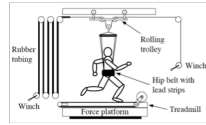
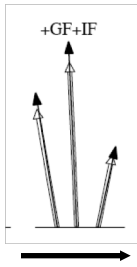


Chang, Kram, 2000

Inertie

Il est possible d'examiner l'effet de l'augmentation de l'inertie ($F_i = m a_x$) indépendamment de la gravité ($F_g = (m - m_2) g$)

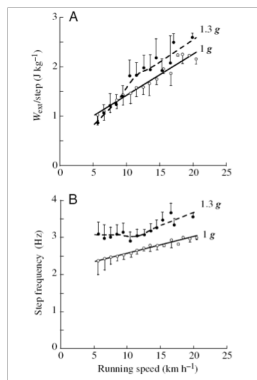




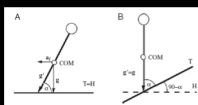
Les forces de réaction au sol conservent une orientation constante de telle sorte que le vecteur résultant demeure confondu avec l'axe du membre inférieur : STRATÉGIE D'ÉCONOMIE



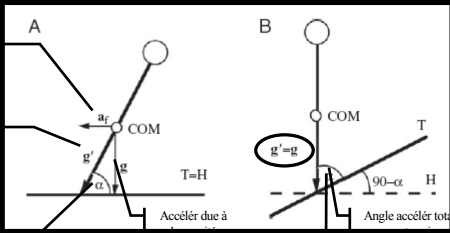
Cavagna et al., 2006

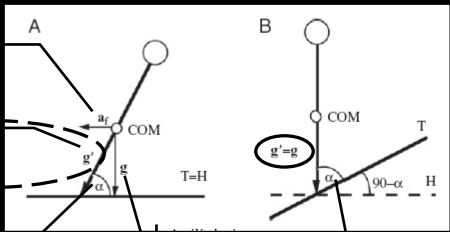


Quand la gravité augmente, le coureur accroît sa fréquence de foulée en maintenant un travail ~ constant par foulée

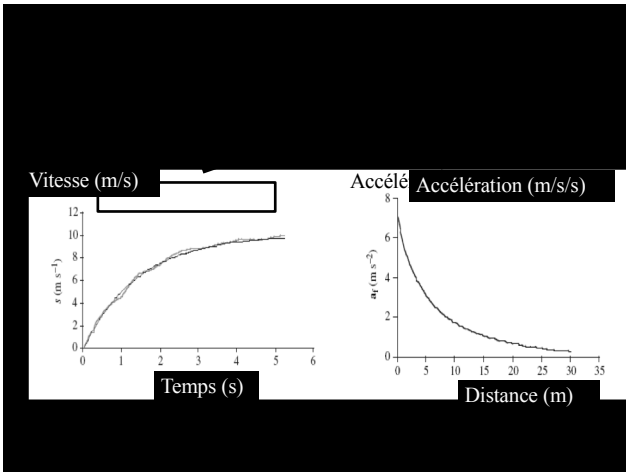


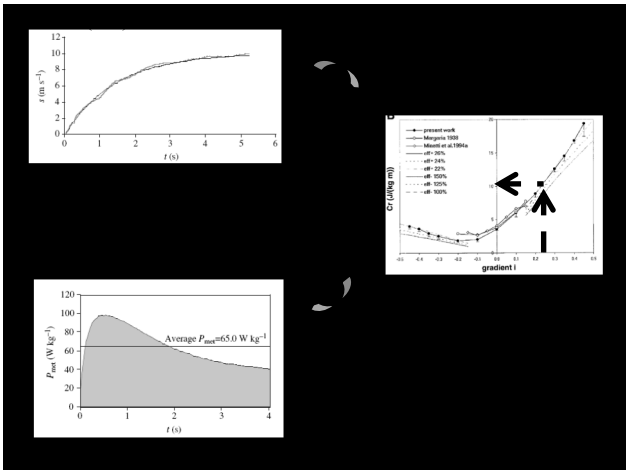
$$ES = \tan(90 - \arctan g / a_f) \quad (4)$$

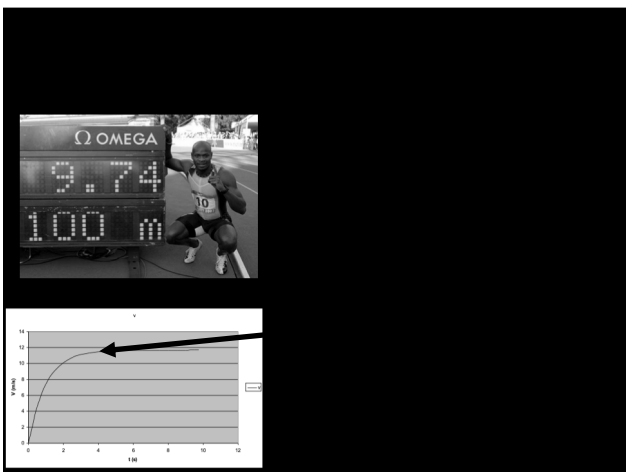


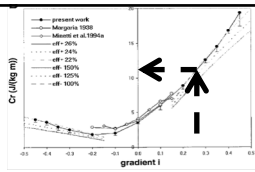


$$ES = \tan(90 - \arctan g / a_f) \quad (4)$$









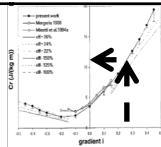
• $=2,92 \text{ m.s}^{-2}$

• Equation 1

$$ES = \tan(90 - \arctan g / a_i) .$$

= 25%

• Le coût énergétique de l'accélération = 12 J/kg/m



• Le coût énergétique de l'accélération de la masse = 12 J/kg/m

• $P_{\text{sprint}} = (C_{\text{coût constant}} + C_{\text{coût accél.}}) \cdot V_{4s} \quad (3)$

$$P_{\text{sprint}} = (3,8 + 12) \cdot 10,27 = 133 \text{ W/kg pendant la phase d'accélération!!}$$

100 W/kg pour les sprinters élités italiens (di Prampero, 2005)

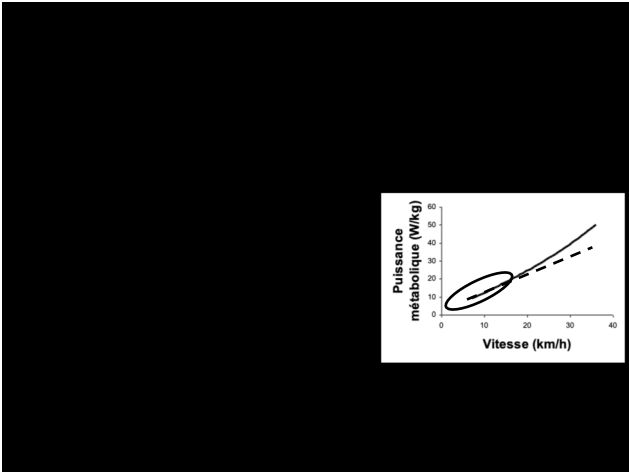
Plan



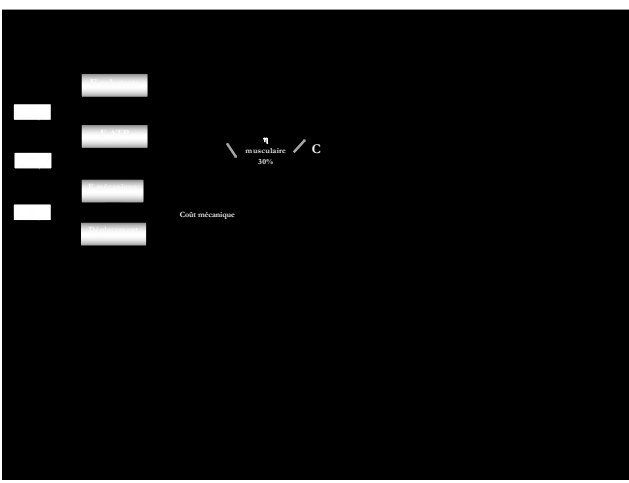
Introduction

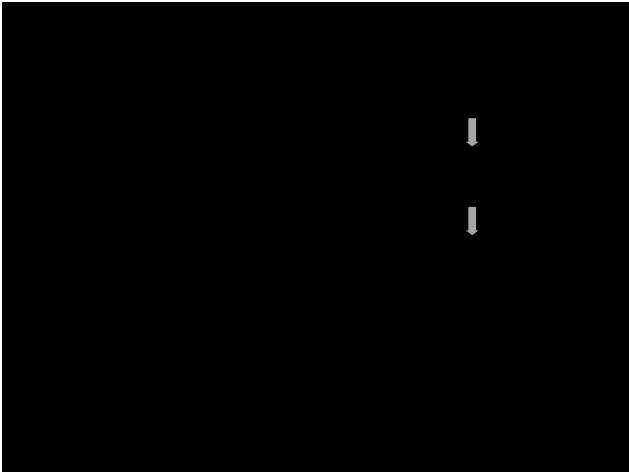
1. Quel degré d'adaptation de l'homme à la locomotion terrestre et aquatique ?
2. Quels sont les facteurs de la performance en natation ?
3. Quels sont les facteurs du coût de la course ?
4. Comment déterminer le coût énergétique dans le sprint ?
5. Pourquoi le coût de la course augmente avec la vitesse ?

4 et 5 non-traités en 2016

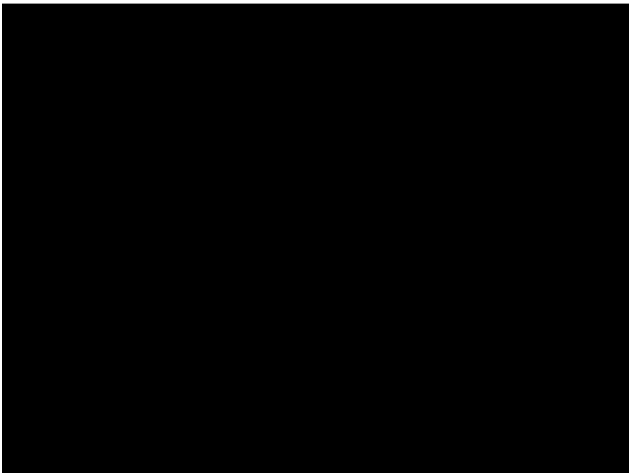


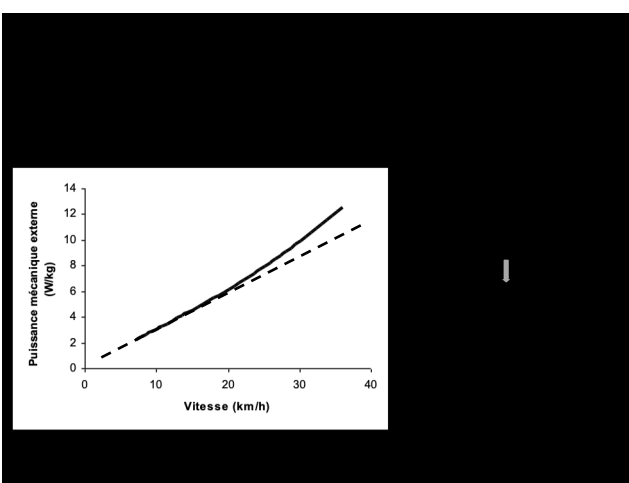


















Force de collision

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 :

1. 10 cm les 2 défenseurs
2. 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 :

1. 10 cm les 2 défenseurs
2. 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

os
 ↓
 Morphologie
 ↓
 Posture et mouvement
 ↓
 Vitesse maximale de course

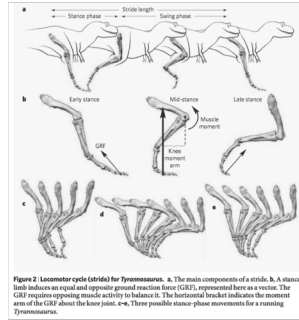


Figure 2. Locomotor cycle (stride) for Tyrannosaurus. a. The main components of a stride. b. A stance limb induces an equal and opposite ground reaction force (GRF), represented here as a vector. The GRF requires opposing muscle activity to balance it. The horizontal bracket indicates the moment arm of the GRF about the base joint, e.g., Three possible stance phase movements for a running Tyrannosaurus.

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 de
course supérieure à 29
km/h

*Les facteurs de la perf ds le
sprint*

• $V = \text{Pana}/C$

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

$W_{\text{int}} (f)$

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

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



Mémento

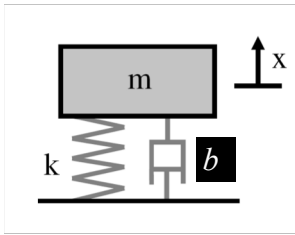
$\bar{v} = \frac{\dot{E}}{C} \quad (1)$

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

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

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

Modèle masse ressort amorti

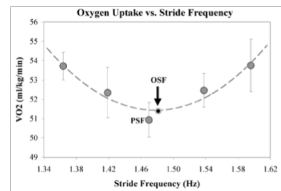


$$Q = \frac{m \sqrt{\frac{k}{m}}}{b}$$

Plus l'amortissement, b , est faible, meilleure est la qualité de la résonance (Q) :

Définition

La résonance survient lorsque la fréquence de forçage exercée sur le système oscillant est en phase avec la fréquence naturelle du système

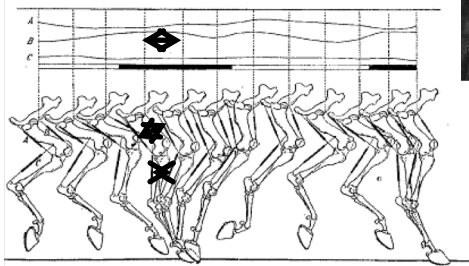


Hunter and Smith, 2007.

Fonction de raideur, pré-sentie dès 1899

<http://dev.europeana.eu/>

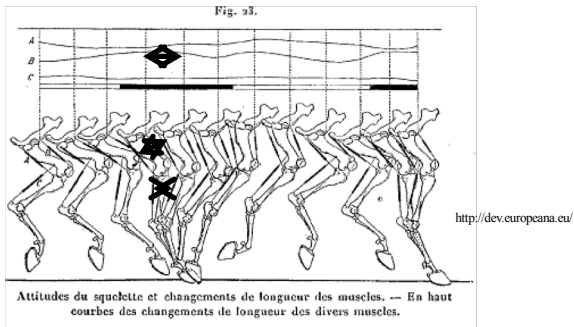
Fig. 33.



Attitudes du squelette et changements de longueur des muscles. — En haut courbes des changements de longueur des divers muscles.

JE Marey: 1899. La Chronophotographie

Les muscles extenseurs subissent de brusques étirements avant qu'ils ne se raccourcissent



J.E. Marey. 1899. La Chronophotographie
