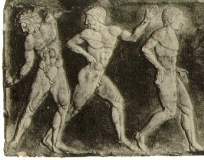


## L2 UE 4.6.3B. Sciences de l'entraînement



CT IH  
2 ECTS

R Candau  
G. Py  
A Chopard

[Robin.candau@univ-montp1.fr](mailto:Robin.candau@univ-montp1.fr)  
[Robin.candau.free.fr](http://Robin.candau.free.fr)

## Programme



- **Facteurs mécaniques de la performance en course à pied et natation** (8 h Robin Candau.)
  - Facteurs mécaniques de la performance en natation
  - Facteurs du coût énergétique dans le sprint
  - Facteurs du coût énergétique sur longues distances
- **Anaérobie et hypoxie** (6h Guillaume Py,)
  - Métabolisme lactique
  - Entraînement intermittent en hypoxie
  - Paradoxe du lactate
- **Recommandations pratiques : Hydratation du sportif** (4h Angèle Chopard)
  - L'eau dans l'organisme
  - Hydratation du sportif
  - Boissons énergisantes versus boissons énergétiques
  - Recommandations pratiques

## Contrôle terminal : QCM



- Questions de Py, Chopard et Candau au prorata des volumes horaires
- 6 articles à télécharger avec chacun au moins une question :
  1. Natation 1. SEV 98 La plus grande piscine du monde.
  2. Natation 2. SEV 99 Les maîtres aquatiques
  3. Lacour JR, Bourdin M. Factors affecting the energy cost of level running at submaximal speed. Eur J Appl Physiol. 2015
  4. Shirreffs SM. Markers of hydration status. J Sports Med Phys Fitness. 2000
  5. Noakes TD. Overconsumption of fluids by athletes. BMJ 2003
  6. Williams J et al. Hydration Strategies of Runners in the London Marathon. Clin J Sport Med 2012

## Plan

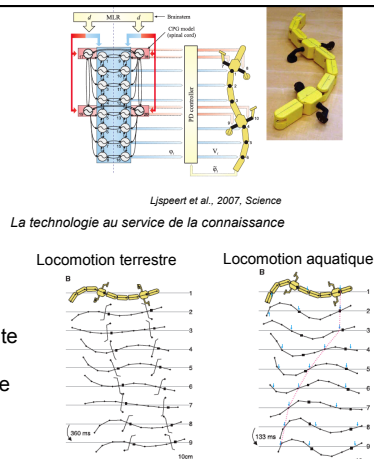


### Introduction

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 ?



Fascination persistante pour la locomotion aquatique et terrestre



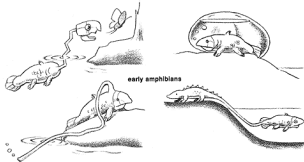
## Degré d'adaptation de l'homme au milieu terrestre et aquatique ?

- Sommes tous capables de marcher et de courir
- Et presque tous de nager

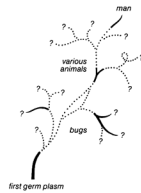


Mais quelle est notre efficacité dans la locomotion terrestre et aquatique ?

## Conquête de la terre ?



## L'homme au sommet de l'évolution?



WWW.besse.at

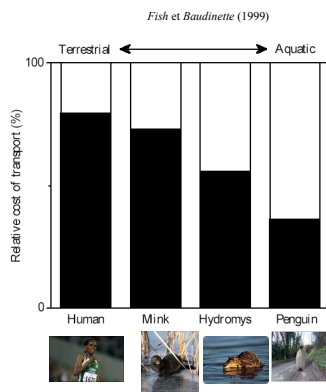
## La nage, une simple adaptation de la locomotion terrestre?

- Mouvements alternatifs des segments qui rappellent la locomotion terrestre
- Pourtant plusieurs mammifères n'utilisent que deux segments (adaptation subtile autorisée par une flottabilité particulièrement bien élaborée)

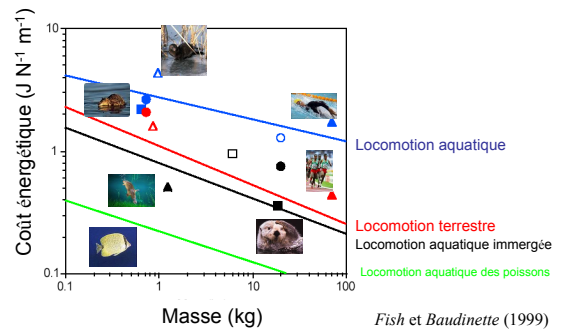


## Économie de la locomotion aquatique/terrestre

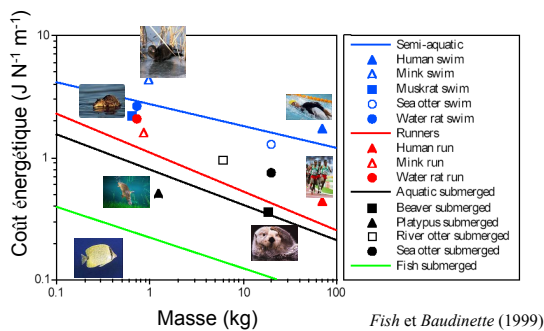
1. Le rat australien est le parfait mammifère amphibie
2. Le manchot est le plus marin
3. L'homme le moins aquatique



## Coût énergétique des mammifères semi-aquatiques



## Pour une masse donnée l'homme est moins économique que les autres mammifères semi-aquatiques



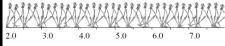
## Et en terme de vitesse max

- Vmax annoncée 110 km/h
- V sur 60m = 8,3m/s → 6s au 50m
- Record du monde → 20,91s au 50m!!

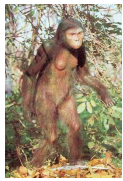


# Et nos ancêtres ?

Sellers et al., 2005



Keith Haring



Lucy une vraie bipède plus efficace que les grands singes



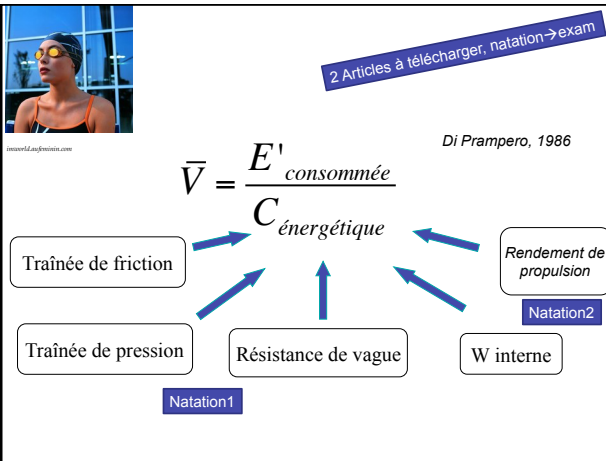
<http://membres.lycos.fr/enejaqueemel/revisionsbac/evolution/>

# 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 ?



## Les résistances hydrodynamiques

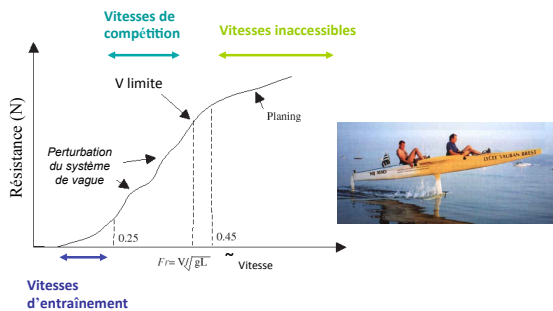


Traînée de pression

Traînée de friction

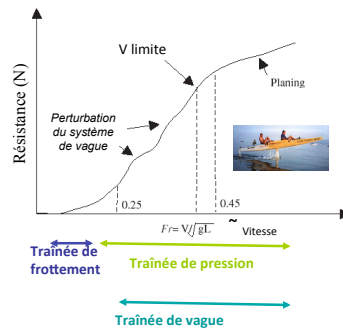
Traînée de vague

## Résistance en fonction des différents registres de vitesse



Vennell et al., 2006

## Ordres d'apparition des différents types de traînée



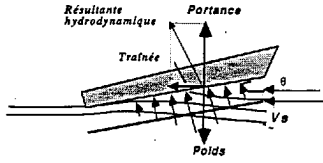
1. A faible vitesse la traînée de frottement s'exprime,
2. à des vitesses supérieures la traînée de pression s'ajoute
3. A des vitesses encore plus élevées la traînée de vague s'additionne aussi

↗ massives des résistances avec la vitesse

Vennell et al., 2006

## Portance dans la locomotion aquatique

<http://njfun2.free.fr/c1/images2/image2b.png>



Et se soustraire à la résistance de vague

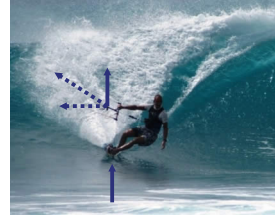


L'objet peut alors partir au **PLANNING**

Contrairement à la locomotion humaine terrestre, la portance revêt une importance majeure dans la locomotion aquatique



## Portance et planning



Conjugaison de la portance de l'aile et de la portance du wake-board



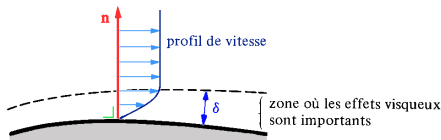
Planning



Réduction de la surface mouillée => grande vitesse

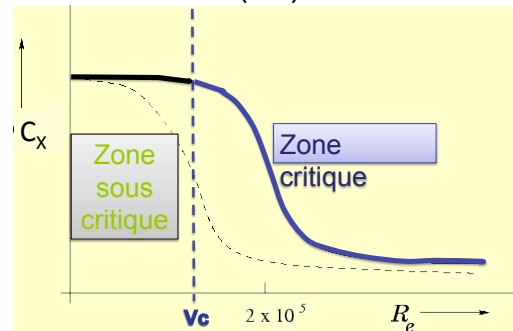
## Traînée de friction

- Liée à la viscosité de l'eau (difficulté à mélanger un sirop dans l'eau)
- La couche d'eau immédiatement en contact avec le nageur colle littéralement à sa peau grâce à des forces de cohésions importantes
- Lorsque l'organisation en couche d'eau juxtaposées est perturbée, une nouvelle force apparaît



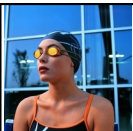
[www-rocq.inria.fr/who/Marc](http://www-rocq.inria.fr/who/Marc)

## Rugosité et coefficient de forme (Cx)



Nombre de Reynolds ~ vitesse

## Comment optimiser l'efficacité de la locomotion aquatique ?



[www.m4angfronin.com](http://www.m4angfronin.com)

Di Prampero, 1986

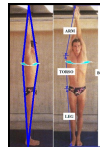
$$\bar{V} = \frac{P_{ana+aérobie}}{C_{énergétique}}$$

Traînée de friction

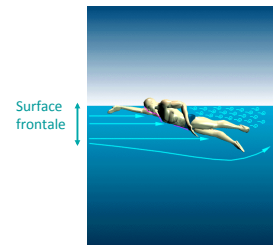
Traînée de pression

Traînée de vague

## Optimisation de la traînée de pression



Surface maximale de section (Toussaint et al., 2000)



[www.f.edu/wright/oggin/wings-ovoids.com](http://www.f.edu/wright/oggin/wings-ovoids.com)

### Optimisation de la position


- À plat sur l'eau (Moment tangage corrélé avec Coût énergétique et la performance)
- Tête dans l'axe (regard au fond du bassin)
- Hyper extension des bras
- Tronc dans l'axe
- Faibles mouvements des membres inférieurs

$$T_{Pression} = \frac{1}{2} S C_x \rho v^2 = K S v^2$$


## Effet du genre

Les nageuses de bon niveau semblent 30% plus économiques que leurs homologues masculins (di Prampero, 1986)


Moment de tangage plus favorable (di Prampero, 1986)



Dimension corporelle plus faible (Toussaint *et al.*, 2000)



## Mesures

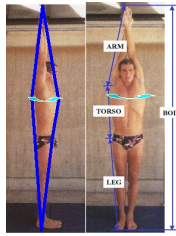


- Longueur de cycle (sur 50m)
- Index moment de tangage (tps pour arriver en position verticale)
- % de masse grasse
- Estimation de la traînée hydrodynamique dans une coulée
- SCx du nageur sur la base de sa décélération dans les phases de glisse

Fin le 26/1/17

## Effet du genre chez l'élite

- Avantage évident de 13% pour les femmes pour les nages les plus rapides en rapport avec une surface de section maximale plus faible pour les femmes



(Toussaint *et al.*, 2000)

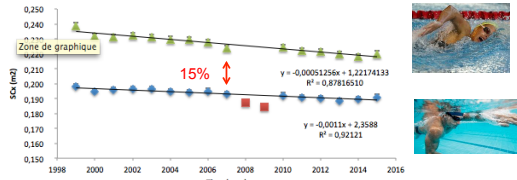
13% < 30% chez les nageurs bon nageurs (Di Prampero, 1986)

Lproaqua2013@gmail.com


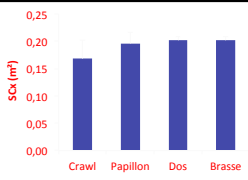
## Effet du genre chez l'élite

Les hommes semblent bénéficier d'un SCx et donc d'un coût énergétique 15% plus faible sans doute en raison d'une taille et d'une distance par cycle (16%) plus importante (et d'une de masse grasse équivalente)

Grande taille → meilleure glisse  
Grande main et bras → meilleure propulsion




## Effet du style



Le crawl est associé au SCx le plus faible donc à des résistances hydrodynamiques et C énergétiques les plus faibles.

Le papillon est plus économique que le dos crawlé. Ce dernier style est peut être désavantagé par des trajets moteurs plus difficilement orientés dans le sens du déplacement.

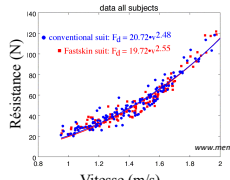

Le papillon est associé à des mouvements ondulatoires similaires à ceux des mammifères marins et poissons (utilisation de la queue ou des jambes comme un foil).



## Port de combinaisons





Combinaison néoprène → meilleure flottaison → ↑ 20% de l'économie

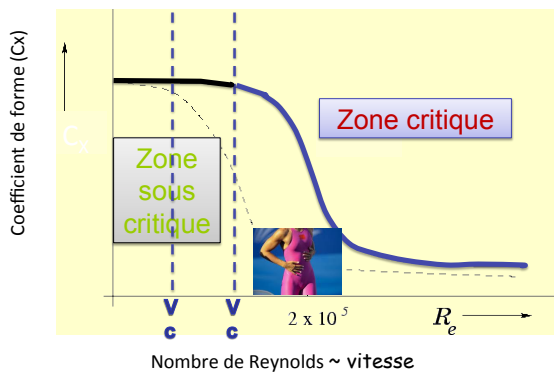



4% de gains annoncés pour les combinaisons « peau de requin » première génération!

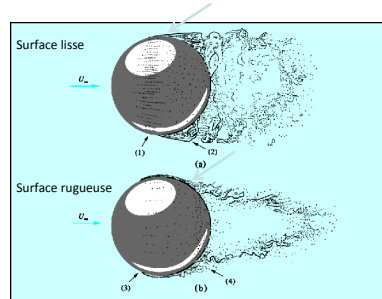
30 à 40 records du monde sont tombés aux Ch. du Monde 2009 : Combinaison de nouvelle génération ?



## Concept de vitesse critique (Vc)

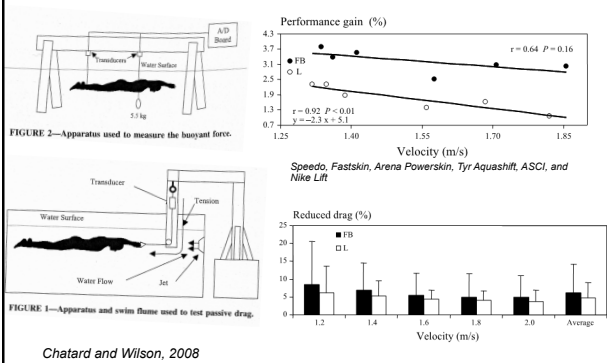


## Mécanisme

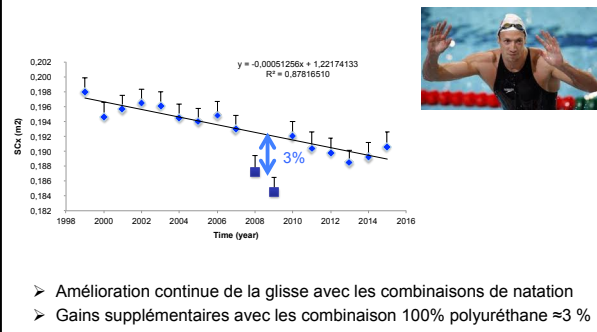


Recul du point de décollement  
 ↓  
 Diminution des turbulences  
 ↓  
 Plus grande vitesse

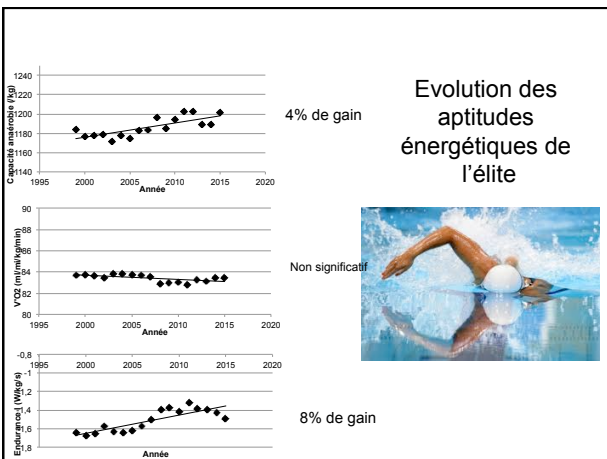
## Combinaison sans polyuréthane



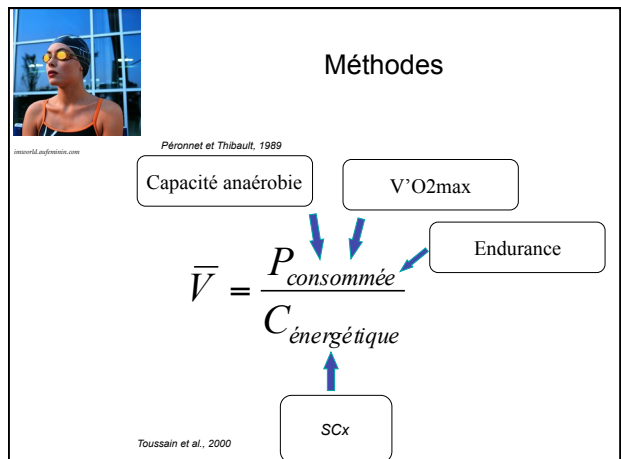
## Combinaisons natation vs. celles polyuréthane



## Evolution des aptitudes énergétiques de l'élite

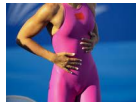


## Méthodes



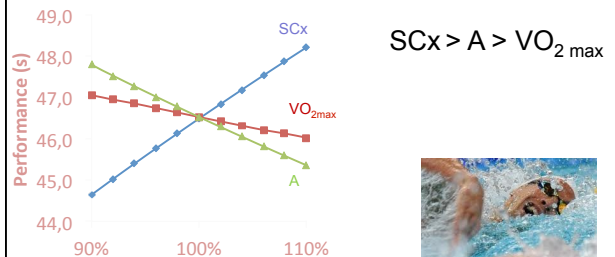
## Origine des gains

1. Gainage et sensations kinesthésiques optimisées
2. Diminution de la surface frontale (S) par compression du corps- réduction des vibrations des muscles
3. Amélioration de la flottabilité grâce au polyuréthane (optimisation de la traînée de vague)
4. Amélioration de la traînée de fiction avec une surface lisse



## Facteurs de la performance sur 100 m

- Une ↓ de 10 % sur SCx détermine un gain de 1,8 s
- Une ↑ de 10 % de la capacité anaérobie, A, détermine un gain de 1,26 s
- Une ↑ de 10 % de  $VO_{2max}$  détermine un gain de 0,5 s



## Application au record du monde sur 100 m

1. Quelle est la traînée?
2. Quelle est la puissance développée?

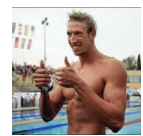
$$\text{Traînée (N)} = \frac{1}{2} SCx \rho V^2$$

Où SCx est le coefficient de traînée hydrodynamique, Cx=le coefficient de forme, S= la surface frontale en m<sup>2</sup>, la densité de l'eau 1000 m<sup>3</sup>/kg

On estime SCx à 0,30m<sup>2</sup>



## Bilan



✓ Les femmes sont effectivement plus économiques que les hommes pour le crawl et le papillon mais sont moins économique en brasse.

✓ Le port des nouvelles combinaisons autorise une meilleure glisse surtout à hautes vitesses.

✓ Par ordre d'importance, les facteurs de la performance sur 100m sont la glisse et la capacité anaérobie.  $VO_{2max}$  ne peut pas être négligé sur 100m.

## Drafting



[www.limmatsharks.com/g](http://www.limmatsharks.com/g)



• ↓ des résistance de 20% avec une distance < 50cm (Chatard and Wilson, 2003)

• Choisir de préférence un poisson pilote « 2 temps »

Nursing and drafting!

## Delicious Drafting



### Comment optimiser l'efficacité de la locomotion aquatique ?

Di Prampero, 1986

$$\bar{V} = \frac{P_{ana+aérobie}}{C_{énergétique}}$$

Traînée de friction

Traînée de pression

Traînée de vague

### Traînés de pression et de vague

La traînée en immersion représente 60% de celle en surface

La traînée de vague représente 40% du total des résistances

Yennell et al., 2006

### Record du monde 2012

#### Importance des gains de performance due à la mono-palme et à l'immersion

Gains dus à l'immersion - 15% (v>2m/s) bien inférieurs aux gains obtenus sur la traînée passive

La traînée de vague représente une part importante en passif un peu moins en situation réelle de nage

### Record du monde 2012

#### Amplitude des gains de performance due à la mono-palme et à l'immersion

Gains dus à la monopalme ~ 25% (v>2m/s)

L'utilisation de matériel en forme de foie avec faible incidence permet une propulsion plus efficace

### Traînée de vague

William Froude(1810- 1878) ingénieur naval

Bourrelet liquide = vague d'étrave

α=39° sillage turbulent

vague d'étrave    vague de poupe

### Minimiser la résistance de vague

La présence d'un bulbe permet d'optimiser le point d'attaque dans l'eau

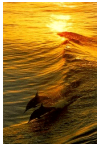
↓ du système de vague

↑ performances

http://www.hickerphoto.com



### Autre stratégie



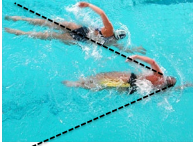
Se placer dans la partie descendante du système de vague crée par le nageur qui précède (Chatard and Wilson, 2003)

↓

Diminue le coût énergétique


↓

Améliore la performance



www.jimmabarba.com/g

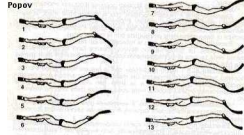
### Autre stratégie



S'affranchir de la traînée de vague, en immersion profonde

↓

Augmentation des performances

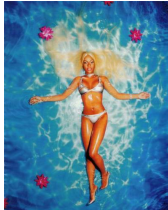


http://perso.orange.fr/napmartinique

### Conclusion


Plusieurs solutions existent pour optimiser la performance en diminuant les résistances hydrodynamiques :

1. Amélioration de la position du corps dans l'eau
2. Drafting
3. Port de combinaison
4. Dans la pente descendante
5. Utilisation de foils



David la Chapelle

### Comment optimiser l'efficacité de la locomotion aquatique ?


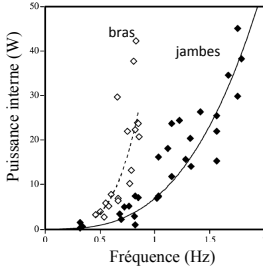


$$\bar{V} = \frac{P_{ana+aérobie}}{C_{énergétique}}$$

Diagram showing factors affecting  $C_{énergétique}$ :

- Travail interne (increases  $C_{énergétique}$ )
- Rendement de propulsion (decreases  $C_{énergétique}$ )
- Traînée de friction (decreases  $C_{énergétique}$ )
- Traînée de pression (decreases  $C_{énergétique}$ )
- Résistance de vague (decreases  $C_{énergétique}$ )


### Travail interne

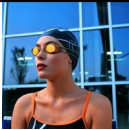
*Zamparo et al. 2005*

La fréquence de jambes est deux à trois fois plus élevée que f bras :

- nageurs 2 temps (Laure Manaudou)
- nageurs 4 temps
- nageurs 6 temps (sprinters)



### Comment optimiser l'efficacité de la locomotion aquatique ?

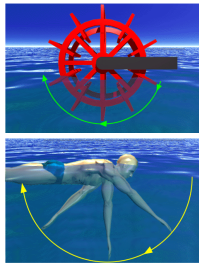


$$\bar{V} = \frac{P_{ana+aérobie}}{C_{énergétique}}$$

Diagram showing factors affecting  $C_{énergétique}$ :

- Travail interne (increases  $C_{énergétique}$ )
- Rendement de propulsion (decreases  $C_{énergétique}$ )
- Traînée de friction (decreases  $C_{énergétique}$ )
- Traînée de pression (decreases  $C_{énergétique}$ )
- Résistance de vague (decreases  $C_{énergétique}$ )

## Efficacité de la propulsion



$$\eta_{Propulsion} = \frac{V_{navire}}{V_{Pale}}$$

Où  $\eta$  est le rendement, et  $V$  la vitesse

$$\eta_{Propulsion} = \frac{V_{nageur}}{V_{bras}}$$

www.fi.edu

Zamparo et al., 2005

## Efficacité de la propulsion



www.fi.edu

$$\eta_{propulsion} = \frac{V_{nageur}}{V_{bras}}$$

En supposant une vitesse angulaire constante :  $V_{bras} = 2\pi f_{bras}$

$$\eta_{propulsion} = \frac{V_{nageur} \cdot 0,90}{2 \cdot \pi \cdot f_{Bras} \cdot L_{Bras}} \circ \frac{2}{\pi}$$

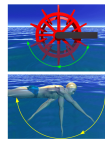
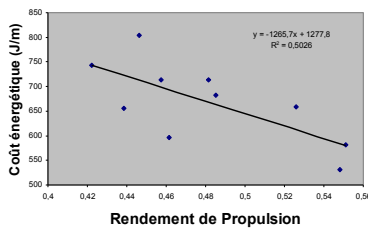
Fréquence de cycle (cycle/s)

Longueur des bras = 0,52 m

90% propulsion assurée par les bras

Zamparo et al., 2005

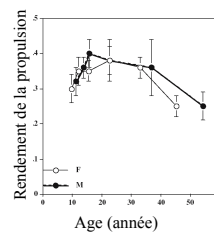
Zamparo et al., 2005



www.fi.edu

Les meilleurs nageurs possèdent les meilleures efficacités de propulsion et sont aussi les plus économiques

## Propulsion et force musculaire



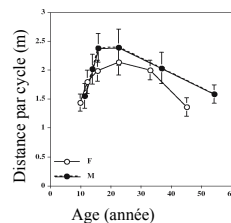
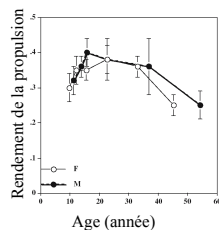
La distance par cycle et le rendement augmentent au cours des processus de maturation puis diminuent au-delà de 25 ans



Le développement de la force est un facteur essentiel

## Rendement de la propulsion

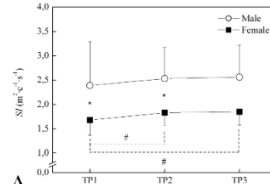
Zamparo et al., 2006



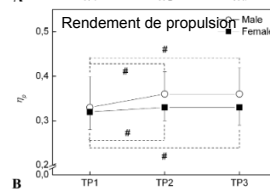
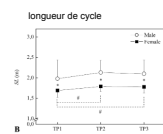
$$\eta_{propulsion} = \frac{V_{nageur} \cdot 0,90}{2 \cdot \pi \cdot f_{Bras} \cdot L_{Bras}} \circ \frac{2}{\pi} \quad \Leftrightarrow d = \frac{V_{nageur}}{f_{Bras}}$$

Le rendement de la propulsion est égal à la distance par cycle à une cste près

## Index de longueur de cycle



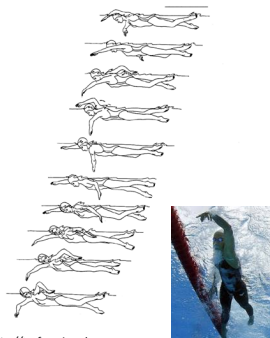
## Effet du genre



	Taille	SI	rendement
femme	1,63	1,6	0,32666667
homme	1,76	2,45	0,35
Genre %	0,0797546	0,53125	0,07143

La Différence de rendement semble liée à la taille, notamment la taille des mains

## Pourquoi a-t-on besoin de force?



<http://tecfu.unige.ch>

- Nécessité d'orienter très tôt dans le cycle de bras les surfaces motrices perpendiculairement au sens du déplacement
- Cela requiert de la force

## En pratique



Priorité accordée à l'efficacité sur la vitesse

NB. Pour Popov lorsque  $f > 23-24$  cycles par 50 m  $\rightarrow$  de la vitesse pour maintenir l'efficacité du mouvement

Entraînement de qualité à vitesse spécifique de compétition

Entraînement de qualité à vitesse modérée (gros volume)

## Développement de la Force

### 1. Renforcement musculaire (circuit training)

- Développé couché / tirage charge légère
- Triceps
- Papillon
- Pullover
- Abdo
- Dorsaux
- Membres inf
- Etirement



### 2. Musculation lourde (1 à 12 répétitions)

## Développement de la Force (suite)

### 3. spécifiques

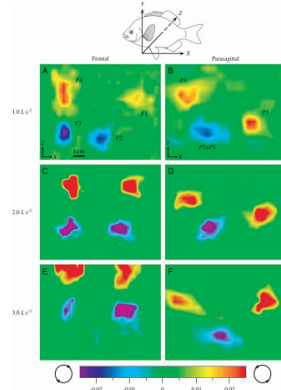
- chariot
- élastique
- plaquettes
- Pull boy
- Palmes
- Sprint

[medias.lefigaro.fr](http://medias.lefigaro.fr)

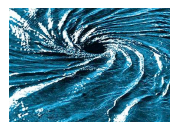


Drucker and Lauder, 2000

Vitesses et masses de l'eau en mouvement



Force de propulsion, F



$$\text{Force} = \text{Momentum } T$$

$$\text{Momentum} = Q \text{ de } mvt = m v$$

$$x T mvt \text{ nageoire}$$

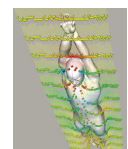
Force

## Bilan

L'homme représente un piètre mammifère semi-aquatique

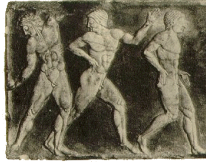
Plusieurs solutions sont toutefois possibles afin d'optimiser sa locomotion en milieu aquatique :

1. En diminuant les résistances hydrodynamiques
2. En augmentant l'efficacité de propulsion
3. En augmentant la force musculaire



[www.memagazine.org/backissues/](http://www.memagazine.org/backissues/)

## L2 UE 4.6.3B. Sciences de l'entraînement



CT IH  
2 ECTS

R Candau  
G. Py  
A Chopard

[Robin.candau@univ-montp1.fr](mailto:Robin.candau@univ-montp1.fr)  
[Robin.candau.free.fr](http://Robin.candau.free.fr)

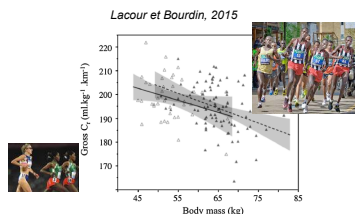
## Plan



### 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 ?

## Genre

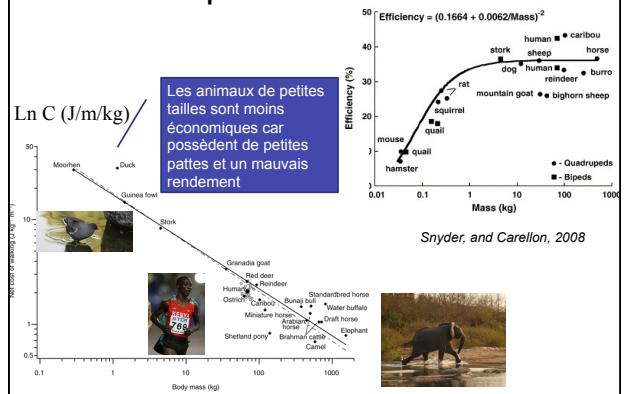


Les femmes sont 13% moins rapides que les hommes sur longues distances

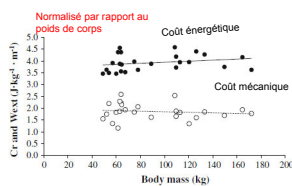
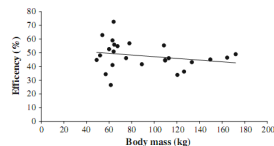
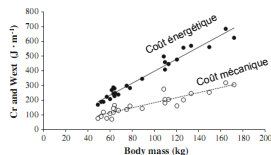
Cependant

Les femmes sont légèrement plus économiques que les hommes quand le facteur masse corporelle est contrôlé

## Masse corporelle



## Chez l'athlète et l'individu obèse



La relation valable au sein de règne animal n'est plus vraie pour un groupe de coureurs et de sujets obèses : les individus les plus lourds étant légèrement moins économiques et avec un rendement musculaire plus faible

Taboga et al., 2012

## Age

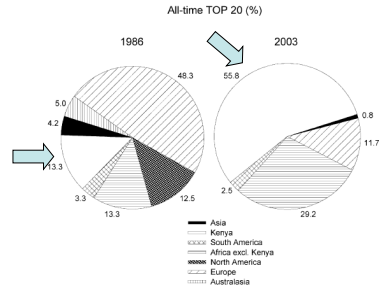


Fauja Singh, surnommé « la tornade en turban » un Britannique de 101 ans a couru à Hong Kong son dernier marathon en 2013

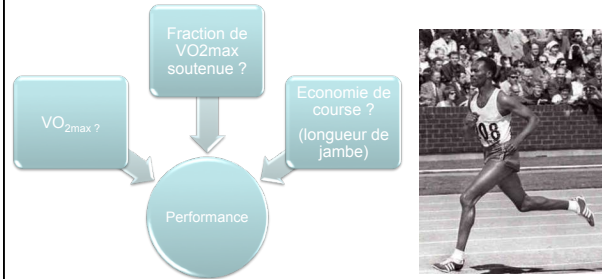
### Effets positifs :

1. de la croissance  
au fur et à mesure de l'allongement des segments, l'économie de course s'améliore
2. des années entraînement  
l'efficacité de la foulée s'améliore au fils des entraînement (diminution des phases de freinage, diminution des oscillations verticales, augmentation du travail élastique)

## Facteurs anthropométriques : Prévalence des Kenyans dans le top 20



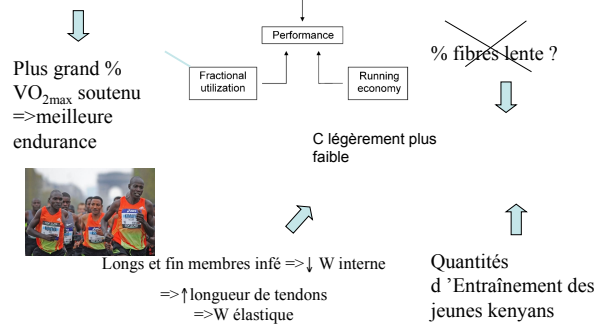
## Origine de la supériorité des kenyans et éthiopiens?



↑ Activité enzymatique ADH => meilleure utilisation des lipides + capillarisation ?

$$VO_{2max} = 85 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$$

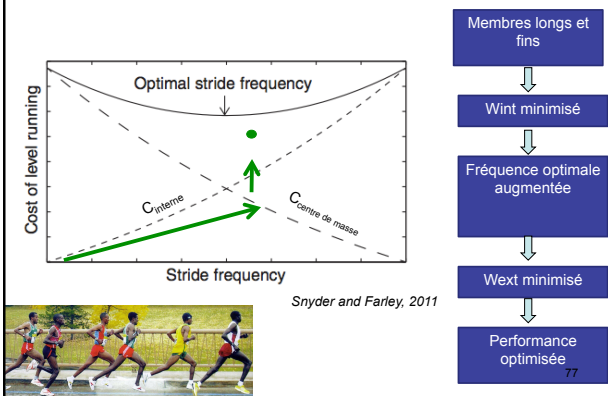
Larsen, 2003



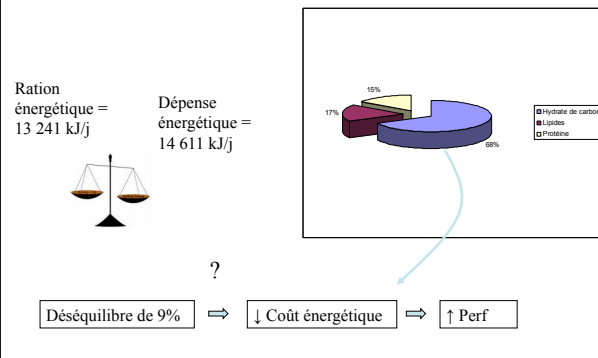
La différence entre kenyan et caucasien ne serait pas due à une différence de  $VO_{2max}$ , ni d'endurance et ni de coût énergétique (Tam et al. 2012)

Mais d'où vient leur suprématie alors?

## Modèle explicatif

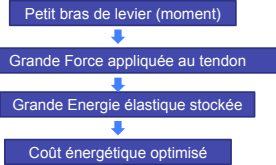
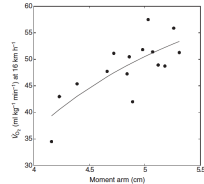
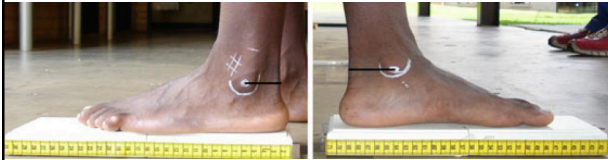


## Régime alimentaire pré-compétition des kenyans



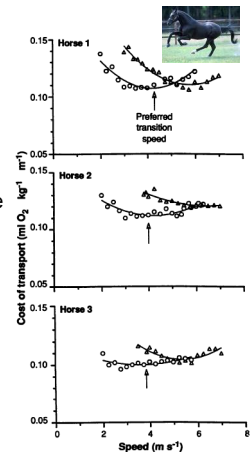
## Bras levier de la cheville et coût énergétique

Scholze et al., 2008



## Effet de la vitesse

- Comme pour les quadrupèdes, l'homme possède une vitesse optimale de course
- mais cette dernière ne serait pas liée à une contrainte d'ordre respiratoire contrairement à ce qui survient chez les quadrupèdes (Willcockson and, Wall-Scheffler, 2012)



Farley et al., 306 (1991); 253 Science

## Variabilité du coût énergétique



- Variabilité inter-individuelle
  1. Genre
  2. Masse et Taille
  3. Age
  4. Caractéristiques anthropométriques
  5. vitesse
- Variabilité intra-individuelle
  - Entraînement
  - Exposition chronique à l'hypoxie
  - Jus de bettrave
  - Course en descente
  - Chaussures à ressort ou avec amorti
  - Longueur de foulée
  - Masse transportée
  - Fatigue
  - Gravité et inertie

## Entraînement



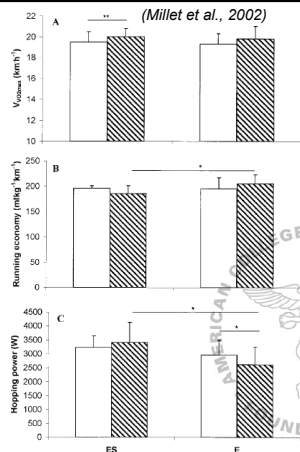
### C↓ à la vitesse correspondant à la vitesse d'entraînement

(Beneke et Hutter, 2005)

La contribution anaérobie diminue grâce à l'entraînement en endurance : pour un exercice intense de flexion-extension la contribution anaérobie est réduite de 44 à 18% chez des athlètes par rapport à des sédentaires (Layeck et al., 2009)

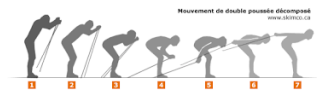
## Musculation

La musculation améliore le coût énergétique grâce à un meilleur contrôle de la raideur et du stockage restitution d'énergie élastique.

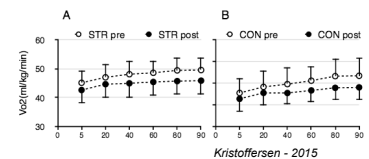


(Millet et al., 2002)

## Musculation du haut du corps chez l'élite 8 s



Mais pas de gain sur l'économie sur une épreuve de 90 min en poussée de bâtons




Mouvement de double poussée décomposé

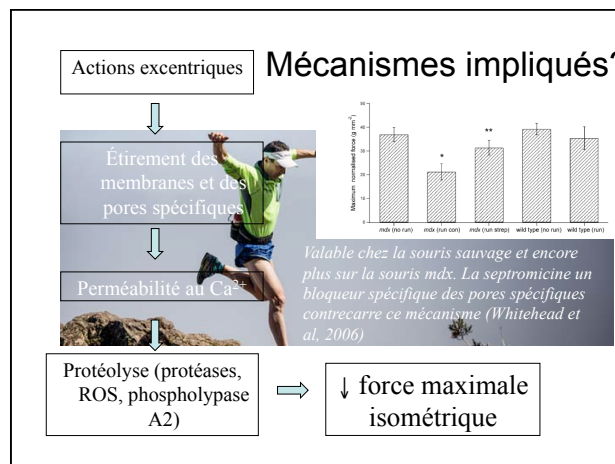
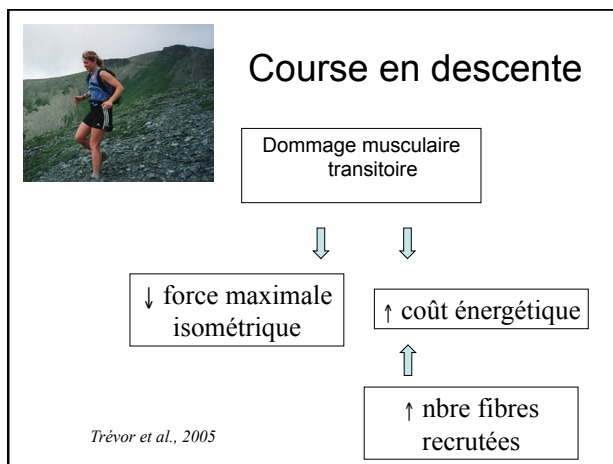
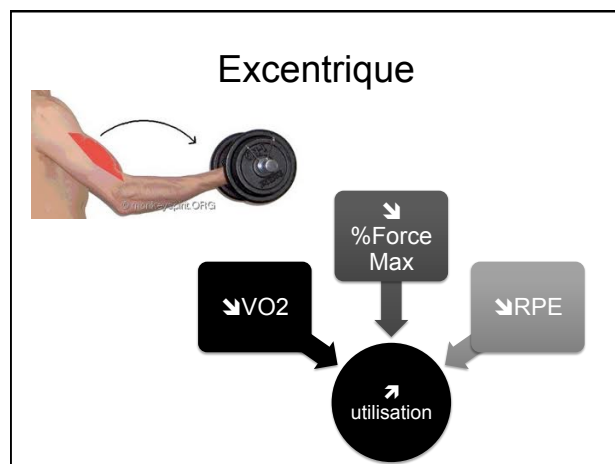
www.STRONG.COM

Kristoffersen - 2015


### Variabilité du coût énergétique



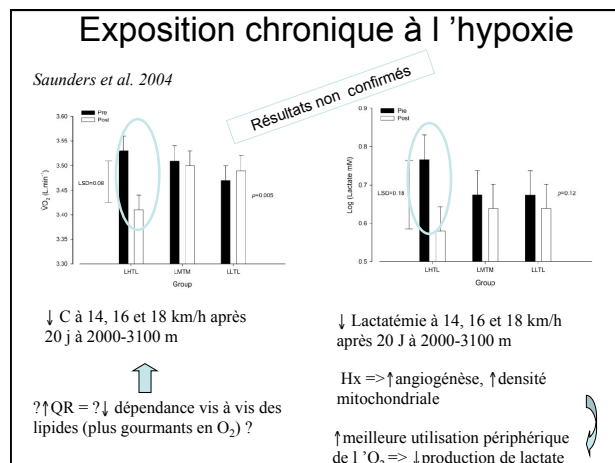
- Variabilité inter-individuelle
  1. Genre
  2. Masse et Taille
  3. Age
  4. Caractéristiques anthropométriques
  5. vitesse
- Variabilité intra-individuelle
  - Entraînement
  - Exposition chronique à l'hypoxie
  - Jus de betterave
  - Course en descente
  - Chaussures à ressort ou avec amorti
  - Longueur de foulée
  - Masse transportée
  - Fatigue
  - Gravité et inertie



### Variabilité du coût énergétique



- Variabilité inter-individuelle
  1. Genre
  2. Masse et Taille
  3. Age
  4. Caractéristiques anthropométriques
  5. vitesse
- Variabilité intra-individuelle
  - Entraînement
  - Exposition chronique à l'hypoxie
  - Jus de betterave
  - Course en descente
  - Chaussures à ressort ou avec amorti
  - Longueur de foulée
  - Masse transportée
  - Fatigue
  - Gravité et inertie



## Hypoxie et hyperoxie

Augmentation du rendement en hypoxie  
Diminution du rendement en hyperoxie (Benoit)

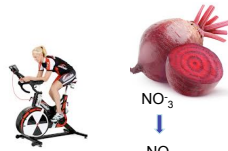
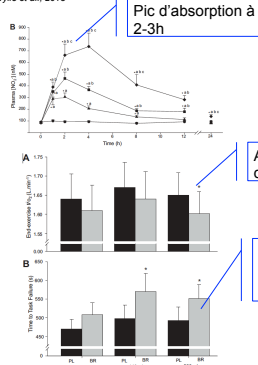


## Variabilité du coût énergétique

- Variabilité inter-individuelle
  1. Genre
  2. Masse et Taille
  3. Age
  4. Caractéristiques anthropométriques
  5. vitesse
- Variabilité intra-individuelle
  - Entraînement
  - Exposition chronique à l'hypoxie
  - Jus de betterave
  - Course en descente
  - Chaussures à ressort ou avec amorti
  - Longueur de foulée
  - Masse transportée
  - Fatigue
  - Gravité et inertie

## Effet du Jus de betterave

Wylie et al., 2013



NO<sub>3</sub>  
↓  
NO  
↓

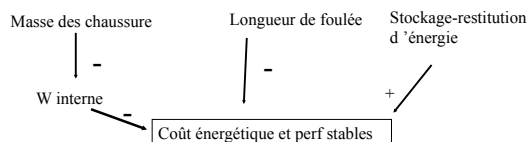
Meilleure perfusion et régulation des neurotransmissions, de l'homeostasie du glucose et calcium, de la contractilité et de la respiration mitochondriale



## Variabilité du coût énergétique

- Variabilité inter-individuelle
  1. Genre
  2. Masse et Taille
  3. Age
  4. Caractéristiques anthropométriques
  5. vitesse
- Variabilité intra-individuelle
  - Entraînement
  - Exposition chronique à l'hypoxie
  - Jus de betterave
  - Course en descente
  - Chaussures à ressort ou avec amorti
  - Longueur de foulée
  - Masse transportée
  - Fatigue
  - Gravité et inertie

## Course avec chaussures à ressort



Mercer et al., 2003



A poids et fréquence de foulée égaux le coût énergétique de la course est 2 à 3% plus faible

Basket de course classique avec maintien de la voute plantaire

En raison d'un meilleur stockage restitution d'énergie élastique par la voute plantaire?

Le 9 fev 17

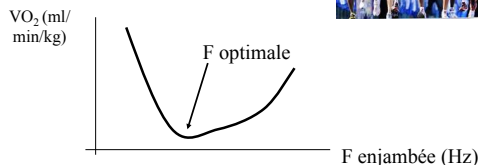
Perl et al., 2012





## Variabilité du coût énergétique

- Variabilité inter-individuelle
  1. Genre
  2. Masse et Taille
  3. Age
  4. Caractéristiques anthropométriques
  5. vitesse
- Variabilité intra-individuelle
  - Entraînement
  - Exposition chronique à l'hypoxie
  - Jus de betterave
  - Course en descente
  - Chaussures à ressort ou avec amorti
  - Longueur de foulée et travail élastique
  - Masse transportée
  - Fatigue
  - Gravité et inertie



*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.*

## Fréquence naturelle

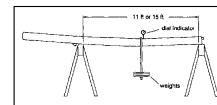
La fréquence naturelle d'un système oscillant simple dépend de sa raideur (k), sa masse (m) :

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

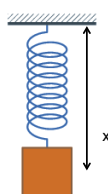
Il existe une fréquence d'enjambée qui optimise le travail élastique et diminue la dépense énergétique

## Définitions

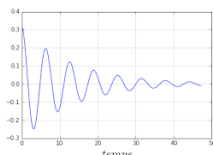
- La raideur est définie comme une résistance à la déformation :  $k = \Delta F / \Delta x$



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



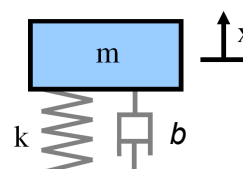
## Mouvement harmonique amorti



- 1 Fonction de raideur responsable du stockage- restitution d'énergie élastique
- 1 fonction d'amortissement responsable de la diminution des oscillations

<http://upload.wikimedia.org/wikipedia>

## Modèle masse ressort amorti

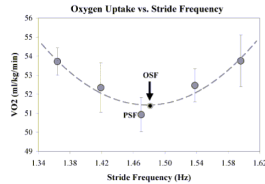


$$Q = \frac{m \sqrt{\frac{k}{m}}}{b}$$

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



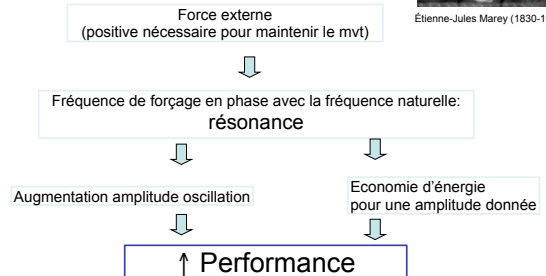
Hunter and Smith, 2007.

## Résonance

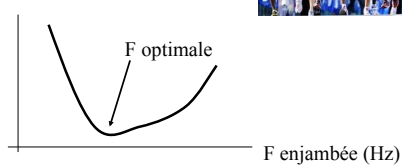
Mouvement amorti



Étienne-Jules Marey (1830-1904)



VO<sub>2</sub> (ml/min/kg)

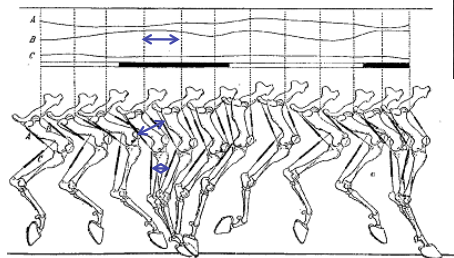


*Si l'on accroît ou décroît la fréquence de forçage, on augmente alors la dépense d'énergie et on vérifie effectivement le phénomène de résonance.*

## Fonction de raideur, pré-sentie dès 1899

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

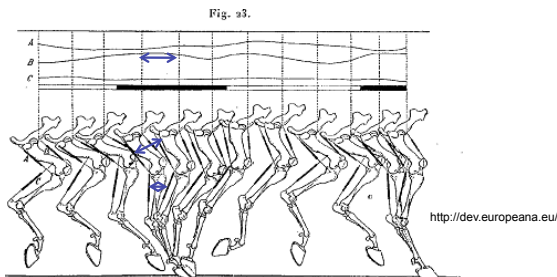
Fig. 23.



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



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

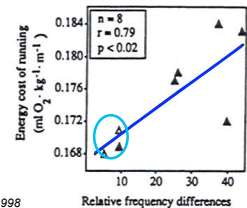
JE Marey, 1899. La Chronophotographie

## Relation entre le coût énergétique et la qualité de la résonance



Étienne-Jules Marey (1830-1904)

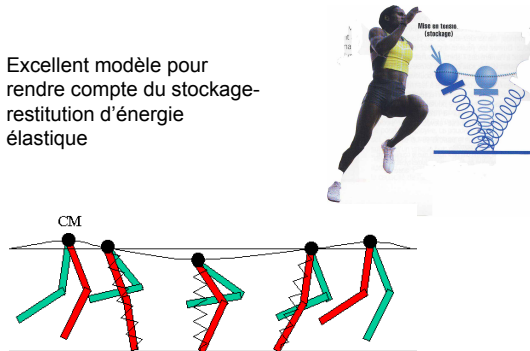
Lorsque la régulation de la raideur est optimale, la fréquence naturelle est en adéquation avec la fréquence d'enjambée et le coût énergétique est optimisé.



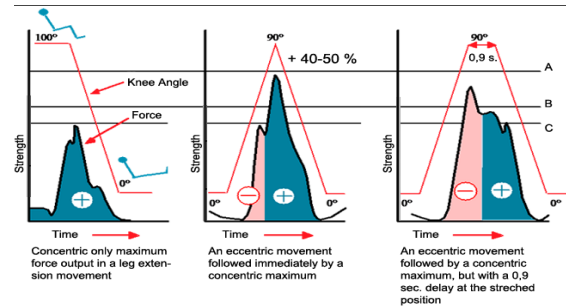
Dalleau et al., 1998

## Modèle masse-ressort

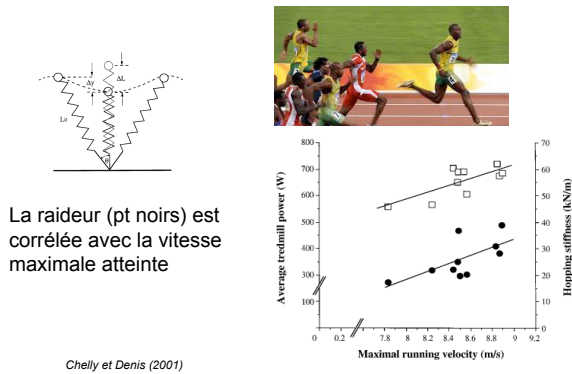
Excellent modèle pour rendre compte du stockage-restitution d'énergie élastique



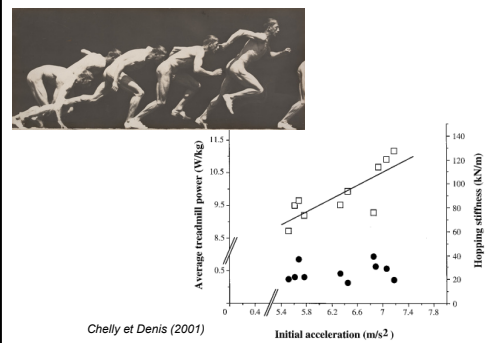
## Augmentation de performance



## Raideur facteur de la performance en sprint

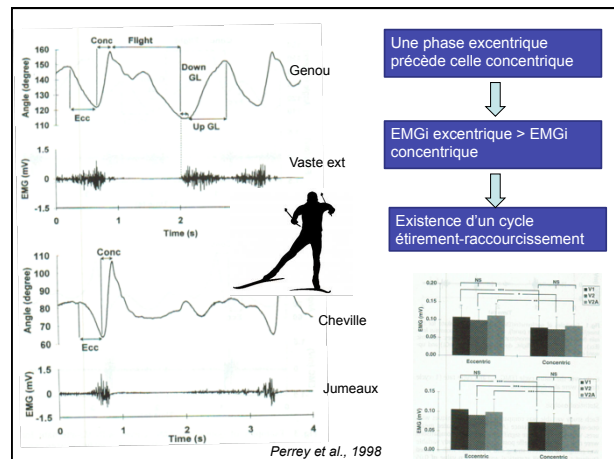
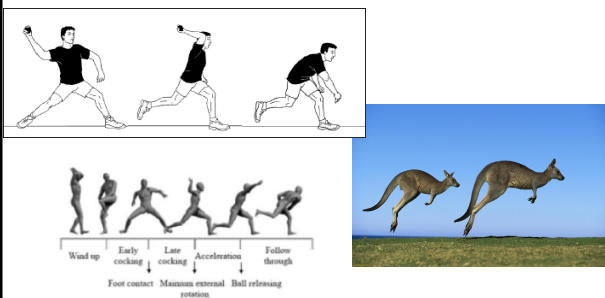


L'accélération initiale indépendante de la raideur (pts noirs) est essentiellement liée à la puissance de l'athlète (pts blancs)



## Les lancers et bien d'autres mouvements

Le cycle étirement-raccourcissement survient dans les lancers



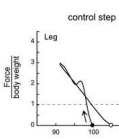
## Ajustement de la raideur



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

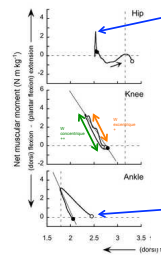
- Si la fréquence augmente → la raideur augmente et les angles de flexion-extension diminuent (Farley and Gonzalez, 1996)
- Course en terrain naturel instable → ajustement de la raideur (Seyfarth et al., 2002; Grimmer et al., 2008)
- Sur surfaces plus ou moins molles, la raideur est modulée (Ferris et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

Course à vitesse stabilisée, 15 km/h



Ressort presque parfait, k élevé, la résilience du ressort n'est pourtant pas de 100%

Distance hanche 90°-110° en % de la longueur de la jambe



Action isométrique dans les 30% du début de contact, rôle stabilisateur nécessaire car la force de réaction au sol n'est pas parfaitement alignée avec la jambe, durant les 70% autres l'extension est réalisée essentiellement passivement

Ressort presque parfait, k élevé,

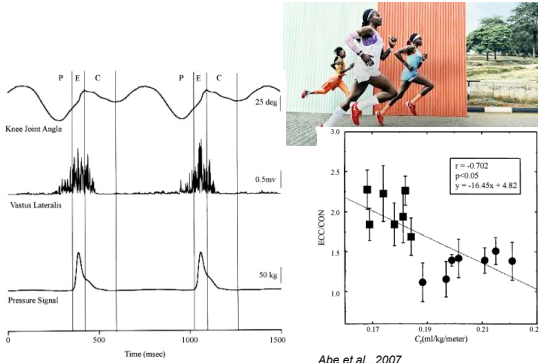
Idem pour l'articulation de la cheville mais ici plus de travail concentrique par rapport à celui excentrique



Mauroy et al., 2013

Les jambes fonctionnent-elles comme des ressorts ?

## Activité Excentrique : un élément clef



Abe et al., 2007

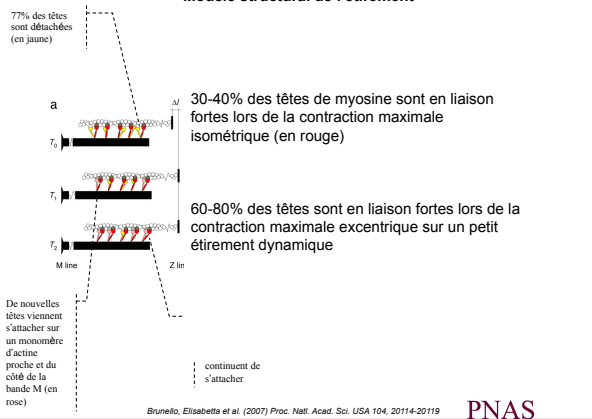
## Raideur et force

Ces deux entités sont corrélées car il s'agit d'une relation de cause à effet, la raideur dépendant de la force et plus exactement du nombre de ponts actine-myosine formés à l'instant t.



<http://speedendurance.com>

## Modèle structural de l'étirement



Brunello, Elisabetta et al. (2007) Proc. Natl. Acad. Sci. USA 104, 20114-20119

PNAS

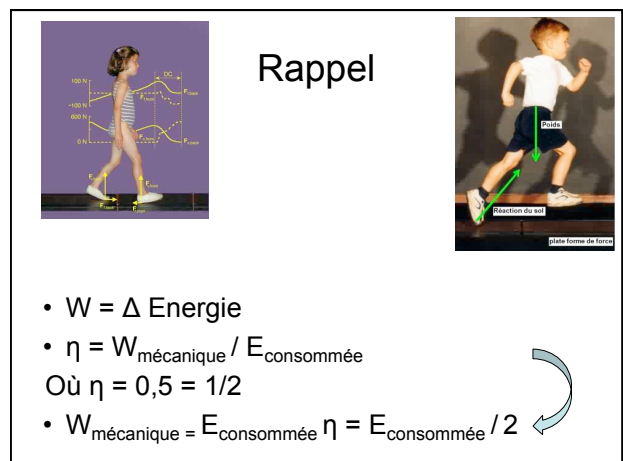
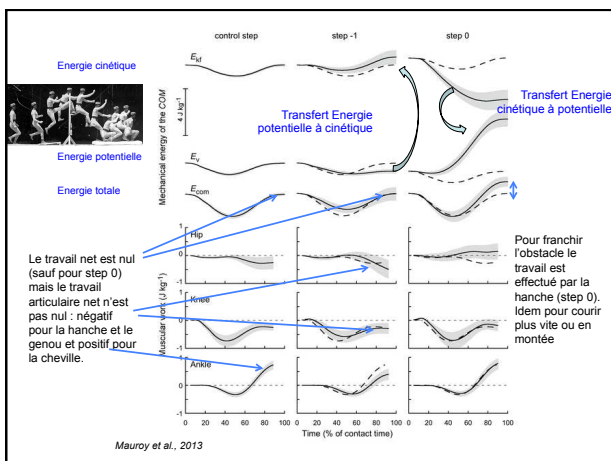
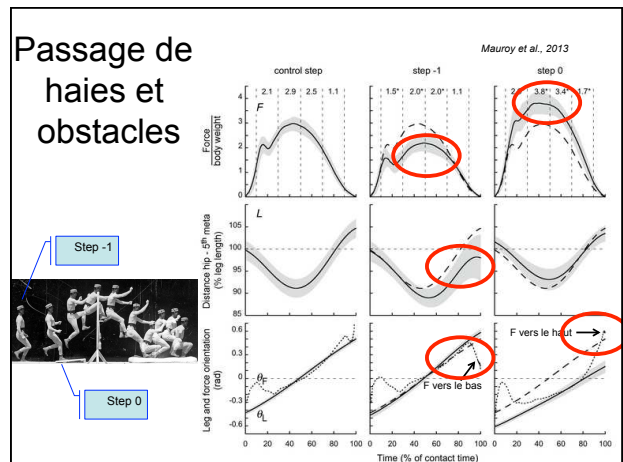
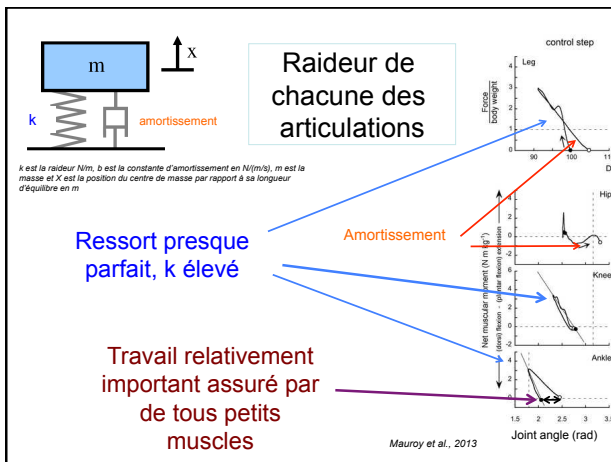
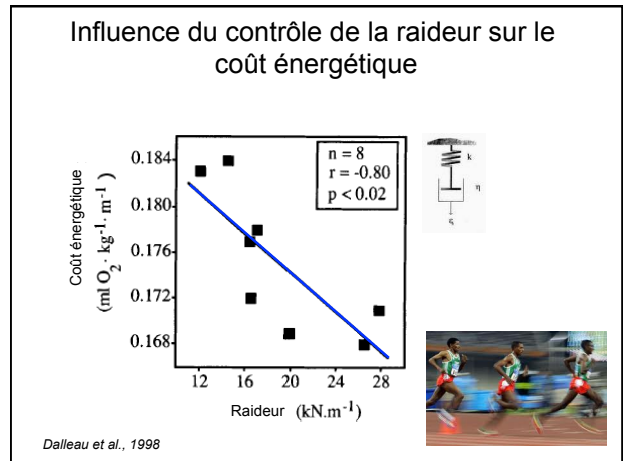
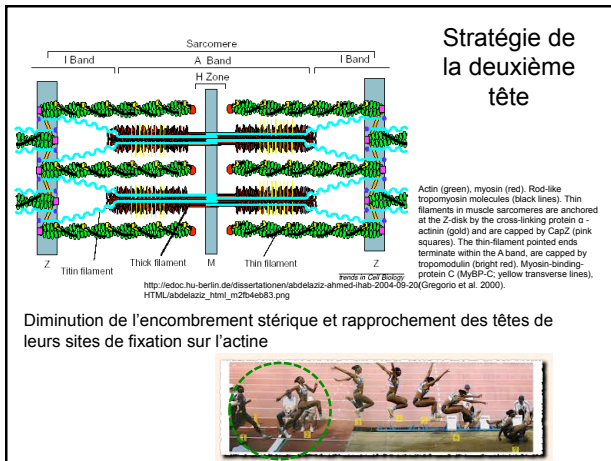
L'étirement lors de la phase excentrique de la course

Diminution de l'encombrement stérique

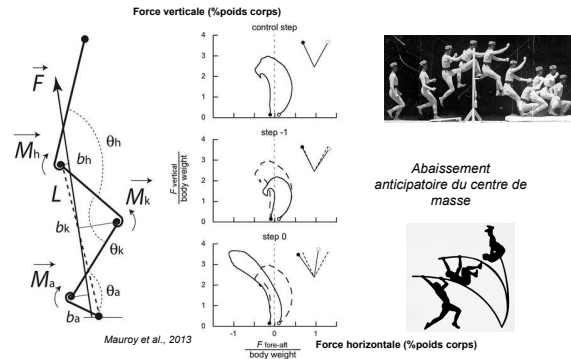
Augmentation du nombre de ponts actine-myosine

Augmentation de la raideur

Optimisation du stockage-restitution d'énergie élastique

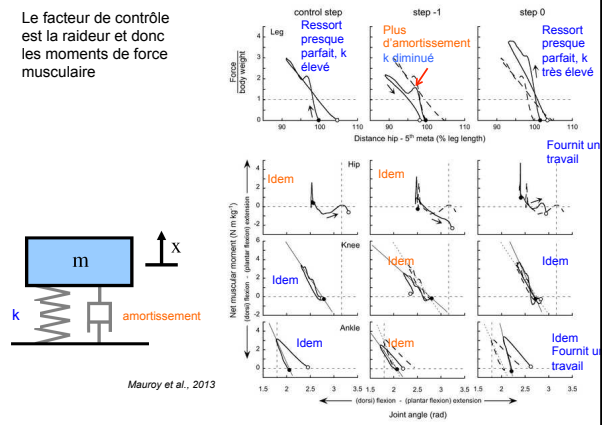


La raideur des membres inf est dépendante de la raideur de torsion des 3 articulations. La raideur articulaire est définie par la relation entre moment de force musculaire ( $M_i$ ) et déplacement angulaire ( $\theta_i$ )



Mauroy et al., 2013

Le facteur de contrôle est la raideur et donc les moments de force musculaire



Mauroy et al., 2013

## Passage de haies et obstacles



Jules Etienne Marey

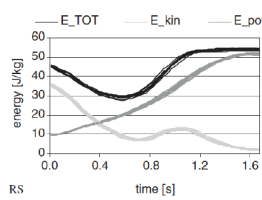
A l'approche d'un obstacle, sur la dernière enjambe, la raideur est diminuée puis lors du dernier contact :

1. La raideur est majorée
2. L'amplitude de flexion est diminuée
3. Le centre de masse (CM) est accéléré vers le haut
4. La vitesse du CM vers l'avant est réduite



Mauroy et al., 2013

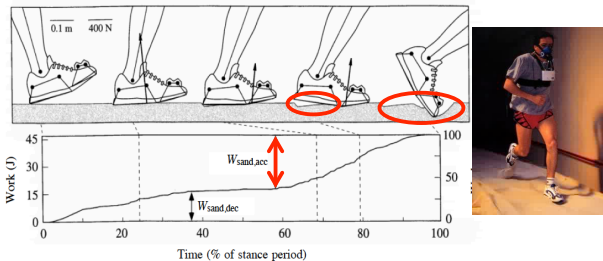
## Transfert d'énergie



Mauroy et al., 2012

## Locomotion sur le sable

Lejeune et al., 1998



Le travail fourni lors de la course sur le sable ne s'accroît que de 15% mais de 60% à 215% pour la marche, le coût énergétique ne s'accroît que de 16% pour la course et de 210 à 270% pour la marche en raison d'une déformation du sable et d'un moindre rendement de la contraction.

## Position au début du contact

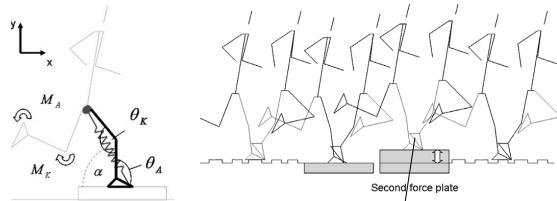
- Flexion importante
- Bras de levier défavorable pour les extenseurs
- Faible raideur
- Grande amplitude de flexion
- Bon amorti



Idem en course, la raideur articulaire est d'autant plus faible que l'articulation est déjà fléchi au moment de la pose du pied pour un moment de force musculaire donné. Inversement la raideur est plus grande jambes tendues



## Franchissement d'une marche

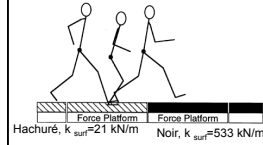


La raideur est diminuée de telle sorte que la trajectoire du centre de masse soit la moins possible perturbée

Muller et al., 2010

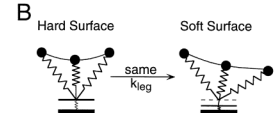
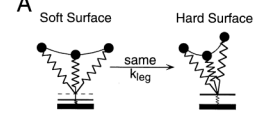
Ferris et al., 1999

L'homme, comme l'animal, s'adapte remarquablement bien à un environnement instable. Grâce à quels ajustements?



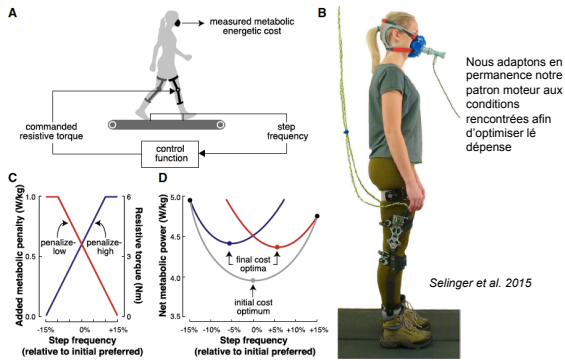
Hachuré,  $k_{surf}=21 \text{ kN/m}$  Noir,  $k_{surf}=533 \text{ kN/m}$

Simulation : distorsion



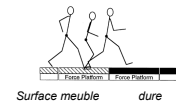
Une régulation de la raideur est nécessaire

## Optimisation rapide possible du coût énergétique de la marche avec une perturbation de la locomotion



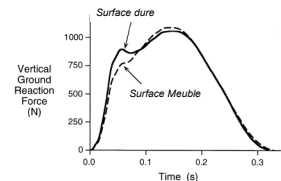
Selinger et al. 2015

## Facteur essentiel de contrôle : la raideur



Surface meuble dure

L'athlète s'organise en ajustant la raideur : augmentatoire compensatoire sur terrain meuble afin de maintenir des forces de réaction au sol à peu près constantes



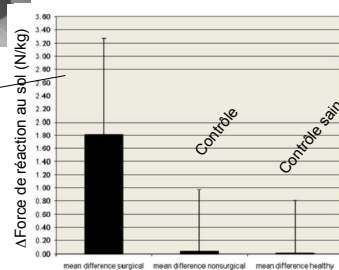
Ferris et al., 1999

## Variabilité des forces de réactions au sol après réparation du ligament croisé antérieur



Chaussures dures puis chaussures avec semelles molles ajoutées

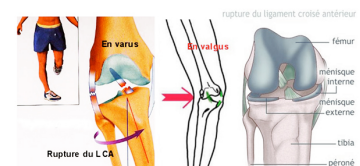
Difficulté à maintenir les forces de réaction stables au sol en raison d'une absence d'ajustement des fonctions d'amortissement et de raideur



Hackney et al., 2010

## Altération du Ligament Croisé Antérieur

Le coût énergétique est majoré pour les sujets opérés ou non (Efthymios Iliopoulos et al., 2015)





<http://thredlist.fr/media/cache/database/muses/icon/sport>

## Ajustement de la raideur

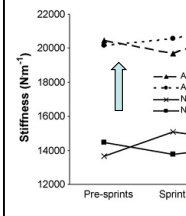
- Lorsque la vitesse augmente, les raideurs du genou et de la hanche sont majorées et représentent les principaux modulateurs de la raideur globale du membre inférieur (Arampatzis et al., 1999; Brughelli and Cronin, Gunther and Blickhan, 2002). La raideur de la cheville varie très peu et représente un faible facteur d'ajustement.
- Lors des sauts verticaux (hopping) sur divers types de surface, c'est la raideur de la cheville qui est ajustée (Farley et al., 1998).

## Effet de l'entraînement et de sprints répétés

LES MAKEY (photographes)



35 m, récup 30s



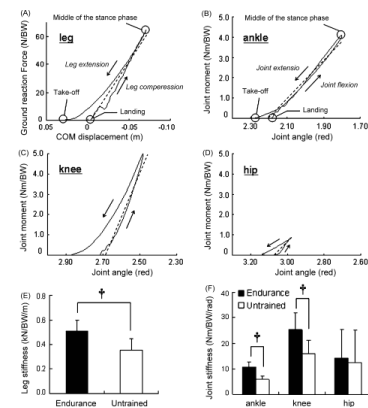
Clark, 2010

Performance  
↑  
Travail élastique  
↑  
Stabilité des articulations  
↑  
↑ Raideur

Travail excentrique



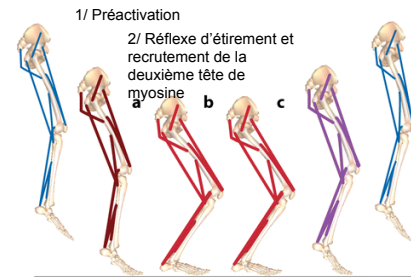
## Entraînement en endurance



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)

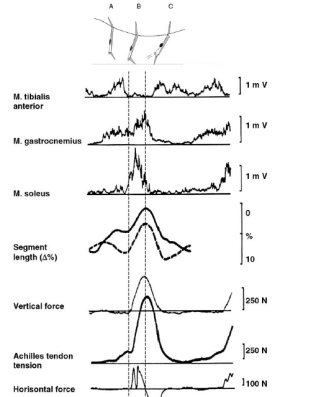
Hobara et al., 2010

## Mécanismes de régulation de la raideur



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

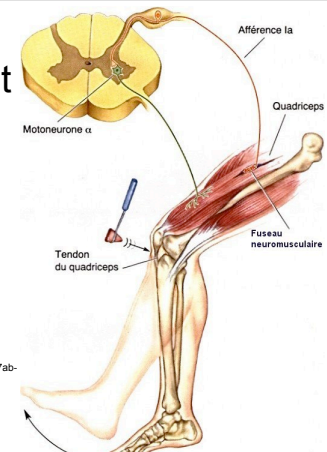
## Préactivation



Komi, 2000

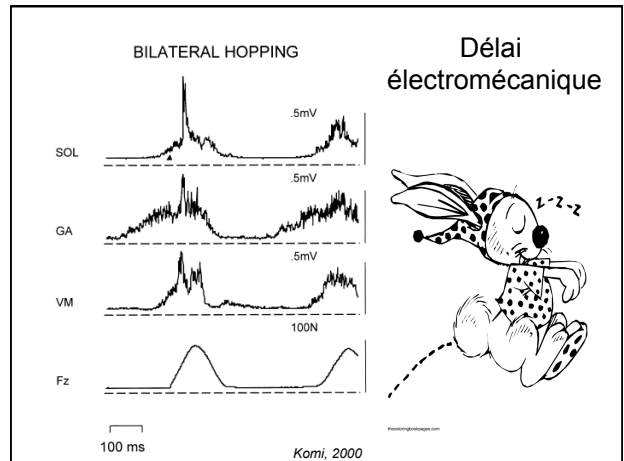
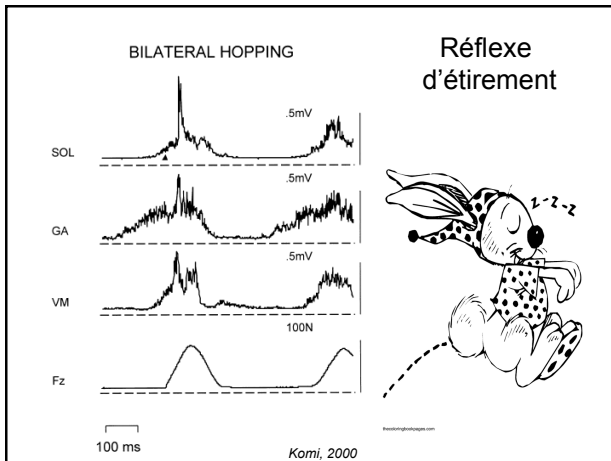


## Réflexe d'étirement



<http://tof.canardpc.com/view/8a6c9b5c-d83a-4ab2-b7ab-eef78aaca329.jpg>

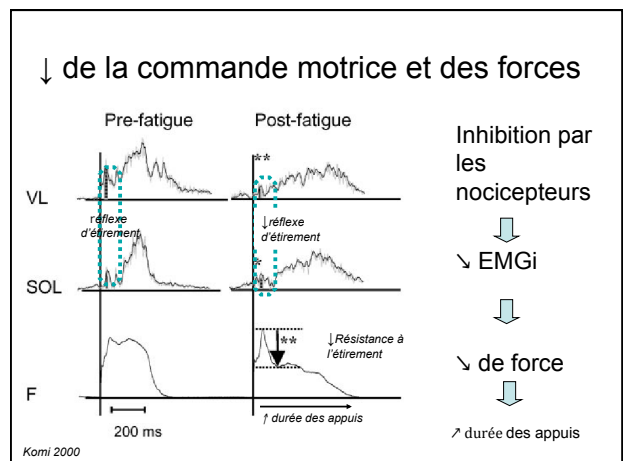
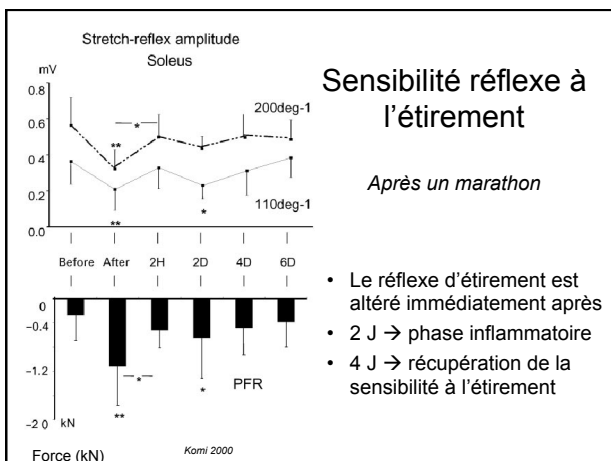
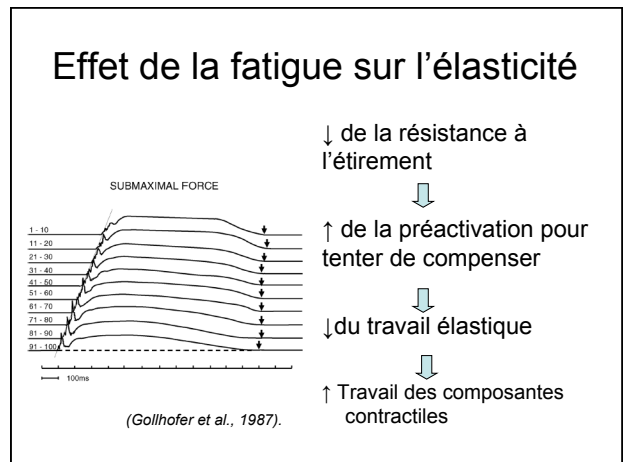




### Réponse mécanique : Sprint vs. Course de fond

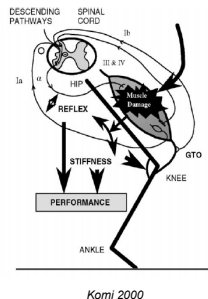
Sport et vie

- Dans le sprint, délai électromécanique de 50 ms => potentiation de la contraction dans la phase de poussée
- Dans la course de fond, délai de 50 ms relativement court par rapport à la phase de freinage (100 à 180 ms), => augmentation de la raideur dans la phase excentrique

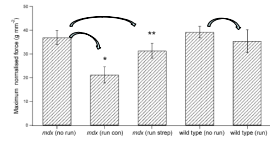
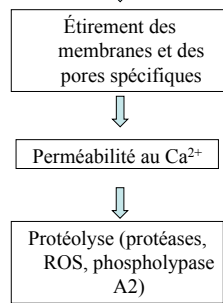


# Mécanismes de la fatigue

- SSC Fatigue
- 1 • Altérations des propriétés contractiles du muscle
  - 2 • Réduction tolérance à l'impact  
• Moindre résistance à l'écrasement
  - 3 • Réduction du travail élastique
  - 4 • Augmentation du travail au cours de la phase de poussée



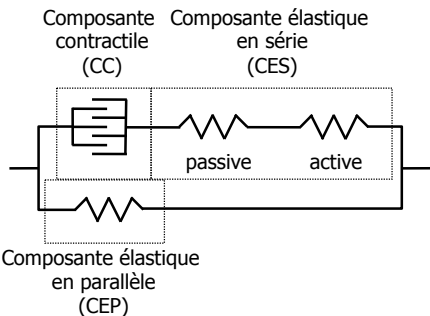
# Mécanismes impliqués?



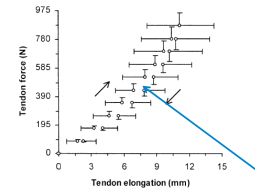
Valable chez la souris sauvage et encore plus sur la souris myopath. La septromicine un bloqueur spécifique des pores calciques contrecarre ce mécanisme (Whitehead et al, 2006)

↓ force maximale isométrique

# Modèle mécanique du muscle



(Shorten, 1987 ; schéma de Hill - 1938 - modifié)



6 sujets, force max isométrique mesurée de l'élongation par ultrasonographie

80% de l'énergie stockée est effectivement restituée

20% est dissipée sous forme de chaleur (rôle d'amortisseur du tendon)

Fig. 3. The gastrocnemius tendon force-elongation relationship in the present experiment. Arrows indicate loading and unloading directions. Values are mean ± SD (n=6).

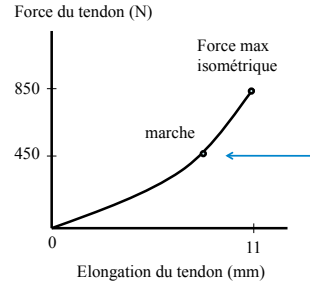
Table 1 Individual data of the gastrocnemius tendon mechanical properties in the study

Subject No.	Stiffness (Nmm <sup>-1</sup> )	Young's modulus (GPa)	Hysteresis (%)	Rebound resilience (%)
1	171	1.215	14.1	85.9
2	181	1.159	21.2	78.8
3	108	0.905	15.9	84.1
4	161	1.230	18.7	81.3
5	125	1.101	15.8	84.2
6	153	1.362	22.5	77.5

Stiffness and Young's modulus data refer to 90-100% of the gastrocnemius tendon load applied during MVC.

C.N. Maganaris, J.P. Paul / Journal of Biomechanics 35 (2002) 1639-1646

# Implications en conditions écologiques

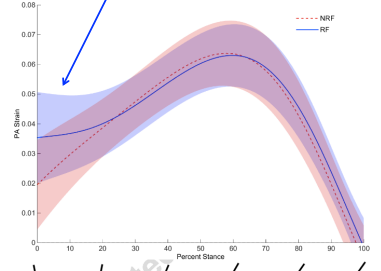
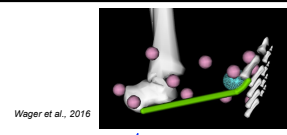


La raideur dépend du nbre de ponts actine-myosine → elle augmente en fonction de la force de contraction

Travail élastique représente 6% du travail externe lors de la marche (et bien plus lors de la course)

C.N. Maganaris, J.P. Paul / Journal of Biomechanics 35 (2002) 1639-1646

# Travail élastique de l'arche plantaire



## Modèle mécanique de Hill

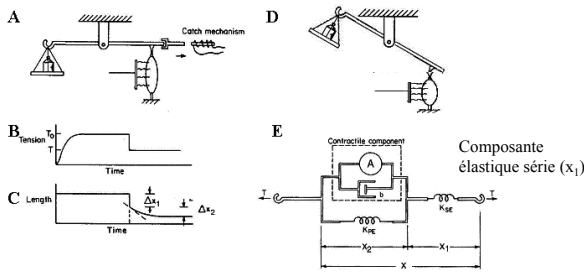
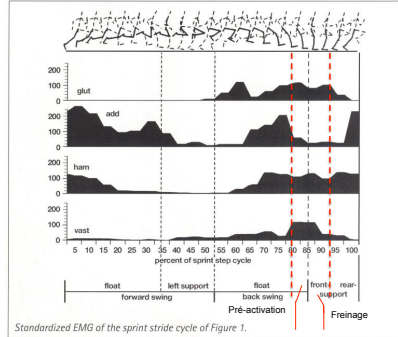


Figure 2. Development of a mathematical muscle model. In this experiment, a muscle is being stimulated when the catch is released. Because there is less weight in the basket than the force that is being produced by the muscle, the muscle shortens rapidly by an amount  $\Delta x_1$  and then gradually by a different amount. From the changes in the length and tension in the muscle, a muscle model is produced. [From T. A. McMahon (1984)].

## Coordination inter musculaire et raideur

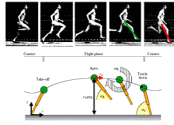
Figure 2. EMG Analysis of Muscular Contributions during Sprinting. Adapted from Weimann and Tidow (1995)



Les extenseurs et leur antagonistes (stabilisateurs) sont massivement recrutés pendant la pré-activation

## Altération du travail élastique lors de sprints répétés

- L'athlète a de plus en plus de peine à réguler sa raideur et tend à s'affaisser sur ses appuis en rebondissant moins
- La performance décroît en même temps que la raideur verticale et le travail élastique sous l'effet de la fatigue (Morin et al, 2006)



## Optimisation du travail élastique

- Musculation lourde
- Sauts verticaux, corde à sauter...
- Bondissements, foulées bondissantes, cerceaux
- Skipping
- Plyométrie
- Travail de pied :
  - ↓ tps de contact
  - ↑ raideur
  - ↓ phase de freinage
  - ↓ amplitude genou hanche
  - ↑ travail cheville



## Variabilité du coût énergétique

- Variabilité inter-individuelle
  - Genre
  - Masse et Taille
  - Age
  - Caractéristiques anthropométriques
  - vitesse
- Variabilité intra-individuelle
  - Entraînement
  - Exposition chronique à l'hypoxie
  - Jus de bettrave
  - Course en descente
  - Chaussures à ressort ou avec amorti
  - Longueur de foulée
  - Masse transportée
  - Fatigue
  - Gravité et inertie



## Masse transportée

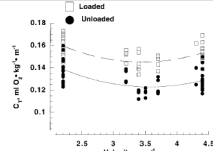


Fig. 2. Cost of transport ( $C_p$ ) is curvilinear and is significantly increased by loading.

Wickler et al., 2001

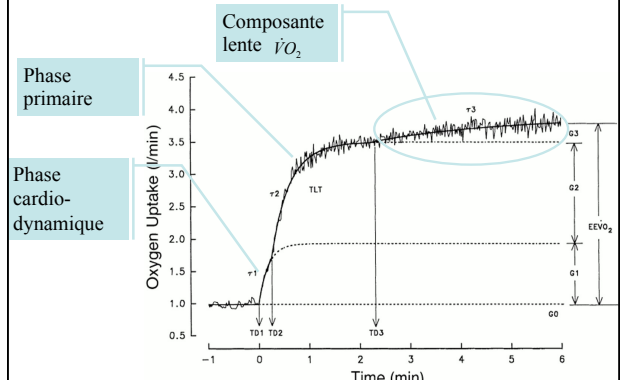
- Absence ou faible effet en course (ml/kg tot/m). L'accroissement de tension dans les muscles ne permet pas d'optimiser le stockage-restitution d'énergie élastique.
- Idem chez le cheval au trot
- Ni en ski de fond, d'ailleurs
- Lors de la marche, C est optimisé notamment chez la femme africaine grâce à un meilleur transfert d'énergie entre E cin et E pot



## Variabilité du coût énergétique

- Variabilité inter-individuelle
  1. Genre
  2. Masse et Taille
  3. Age
  4. Caractéristiques anthropométriques
  5. vitesse
- Variabilité intra-individuelle
  - Entraînement
  - Exposition chronique à l'hypoxie
  - Jus de betterave
  - Course en descente
  - Chaussures à ressort ou avec amorti
  - Longueur de foulée
  - Masse transportée
  - Fatigue
  - Gravité et inertie

## Effet de la fatigue



## Effet de la fatigue sur le coût énergétique

$$\bar{V} = \frac{\dot{E}}{C} \quad \text{En condition aérobie :} \quad \bar{V} = \frac{\dot{V}O_2 - \dot{V}O_{2repos}}{C}$$



$$\text{En isolant C :} \quad C = \frac{\dot{V}O_2 - \dot{V}O_{2repos}}{\bar{V}}$$

## Effet de la fatigue sur le rendement musculaire

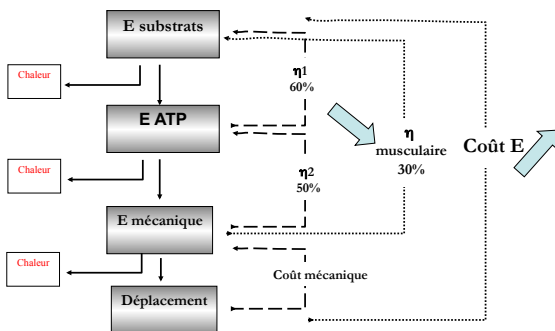
$$\eta = \frac{Pméca}{\dot{E}}$$



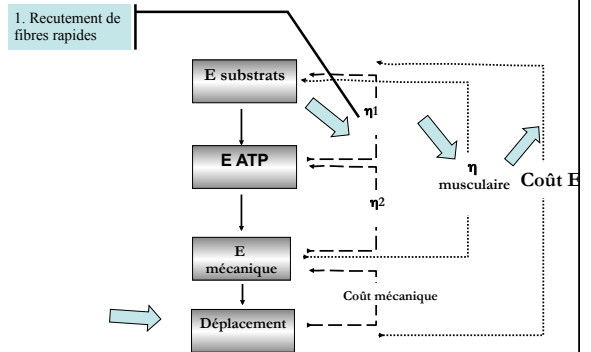
En condition aérobie :

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

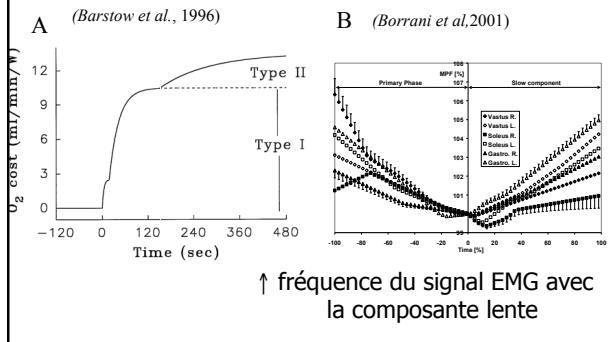
## Coût énergétique et Rendement



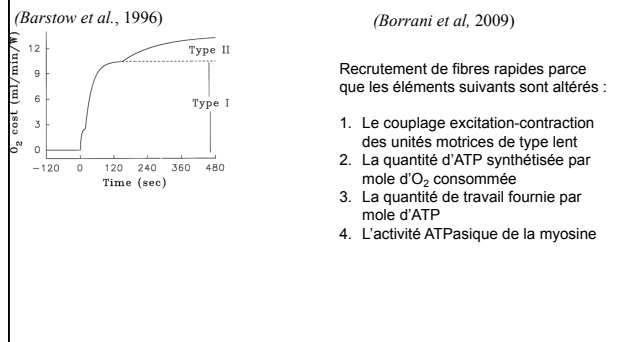
## 1er mécanisme



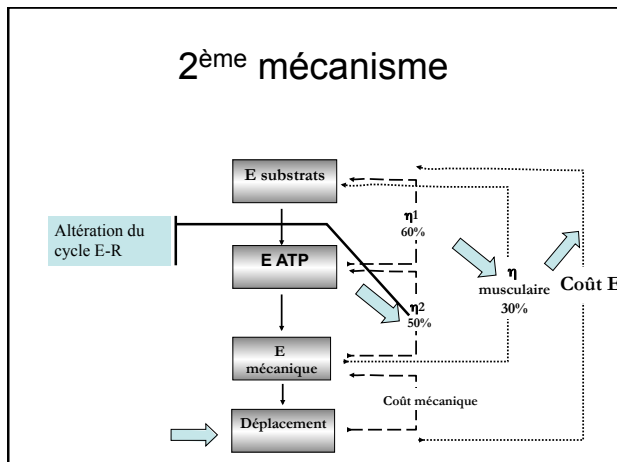
## Recrutement de fibres rapides ?



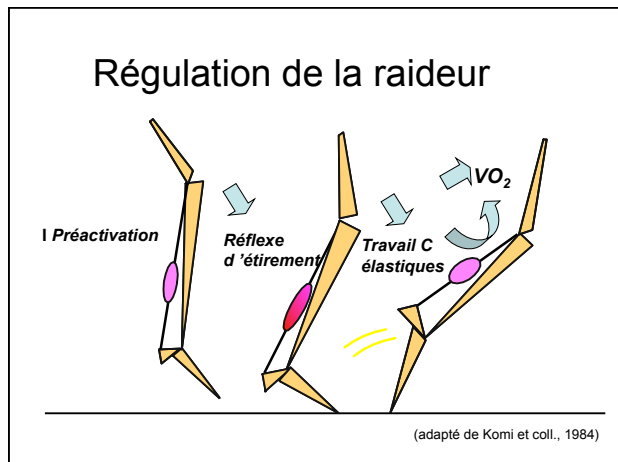
## Recrutement de fibres rapides ?



## 2<sup>ème</sup> mécanisme



## Régulation de la raideur

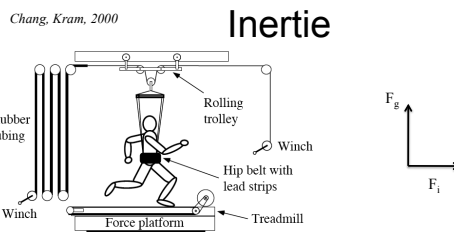


## Variabilité du coût énergétique

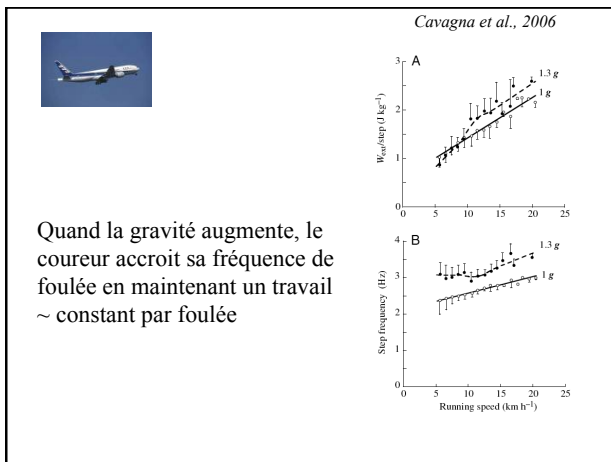
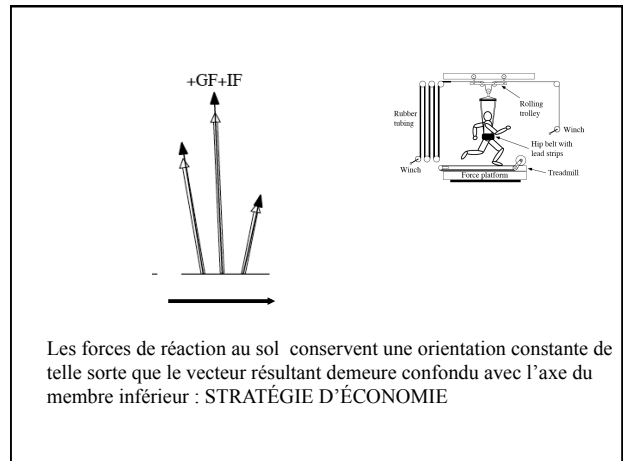
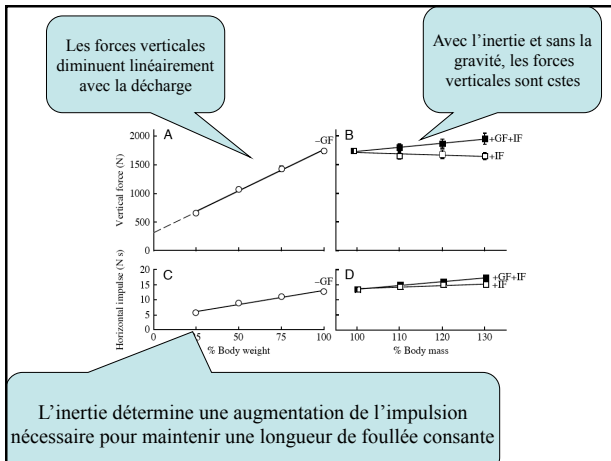


- Variabilité inter-individuelle
  1. Genre
  2. Masse et Taille
  3. Age
  4. Caractéristiques anthropométriques
  5. vitesse
- Variabilité intra-individuelle
  - Entraînement
  - Exposition chronique à l'hypoxie
  - Jus de betterave
  - Course en descente
  - Chaussures à ressort ou avec amorti
  - Longueur de foulée
  - Masse transportée
  - Fatigue
  - Gravité et inertie

## Inertie



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



## 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

## Introduction

Performance = puissance métabolique / économie

$$= \frac{(A/t + VO_{2max} f)}{C}$$

Importance des aptitudes énergétiques

Importance des facteurs mécaniques de l'économie de déplacement

## Coût énergétique dans le sprint

Di Prampero et al., 2005

- Impossibilité de mesurer directement la puissance métabolique et C dans le sprint

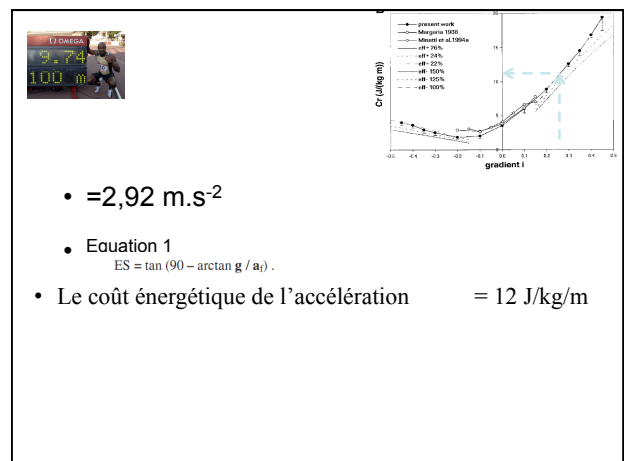
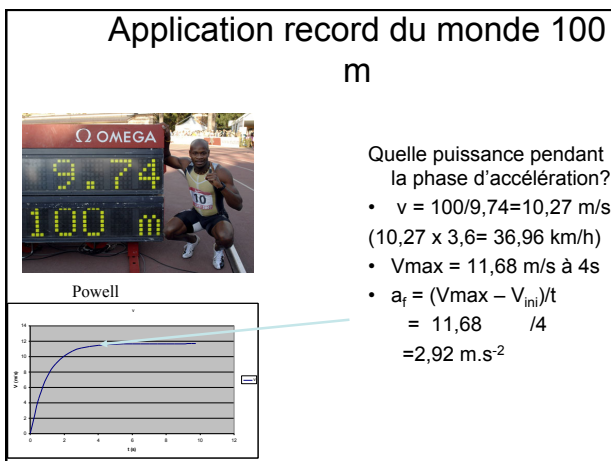
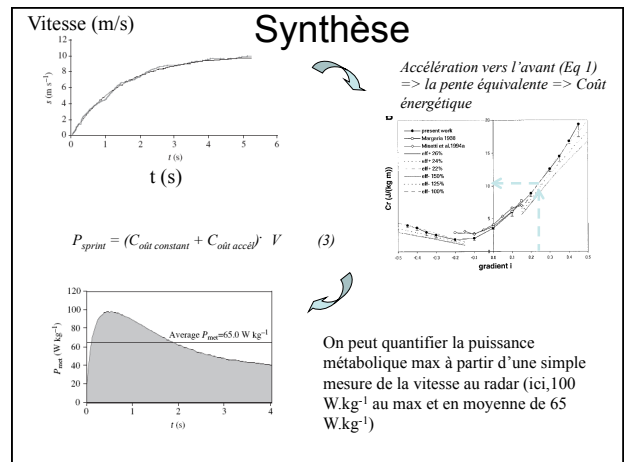
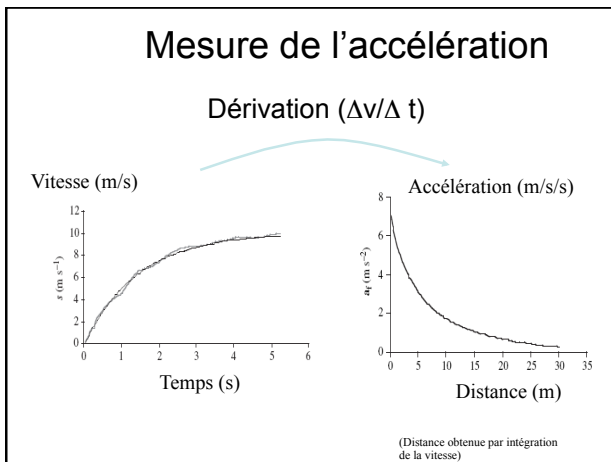
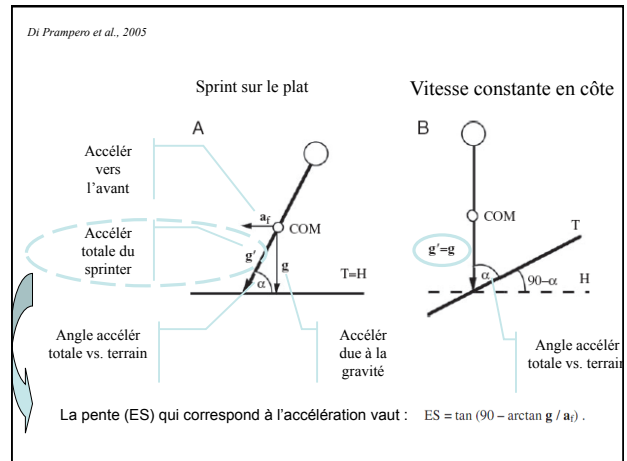
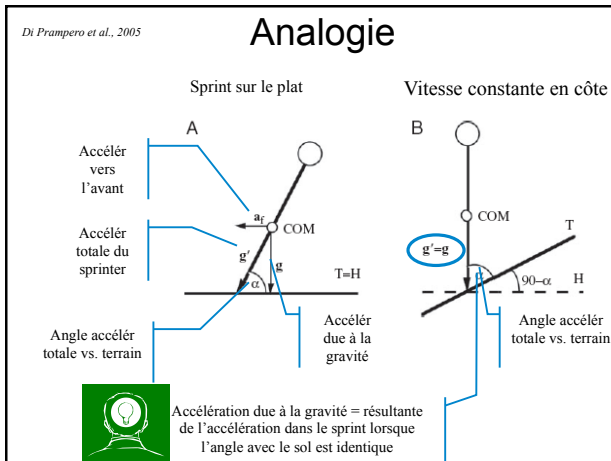
Approche mécanique :

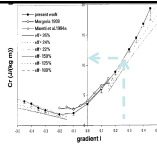
Puissance métabolique = puissance à v cste + puissance pour accélérer

Sprint sur le plat

V cste en côte

La puissance pour accélérer peut être évaluée en établissant un parallèle entre sprint sur le plat et course à V cste en côte





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

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

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

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

## Plan



### Introduction

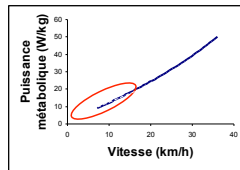
1. Quel degré d'adaptation de l'homme à la locomotion terrestre et aquatique ?
2. Quels sont les facteurs de la performance en natation ?
3. Quels sont les facteurs du coût de la course ?
4. Comment déterminer le coût énergétique dans le sprint ?
5. Pourquoi le coût de la course augmente avec la vitesse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

4 et 5 non-traités en 2016

## Coût énergétique en course à pied

### • Evolution de C avec la vitesse

– à vitesse constante sousmaximale,  
 $C = 3,86 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$



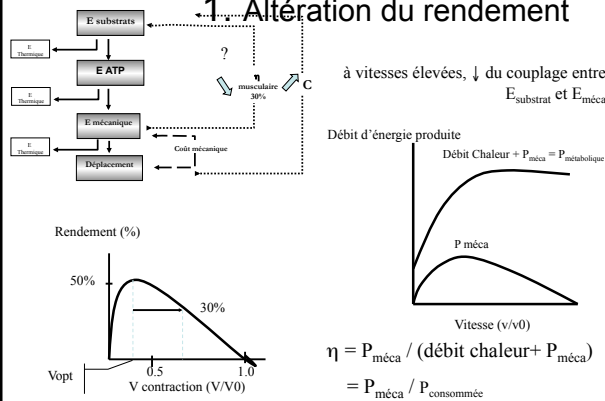
Quelle est l'origine de l'augmentation du Coût énergétique pour des vitesses élevées et stables ?



## Pourquoi C augmente?

1. ↓ rendement?
2. ↑ contribution du métabolisme anaérobie?
3. ↑ puissance mécanique externe?
4. ↑ puissance mécanique interne?
5. ↑ puissance aérodynamique?

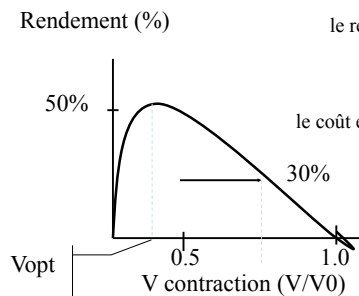
## 1. Altération du rendement



A vitesse élevée le muscle travaille loin de sa zone optimale de fonctionnement

↓  
le rendement chute

↓  
le coût énergétique est altéré



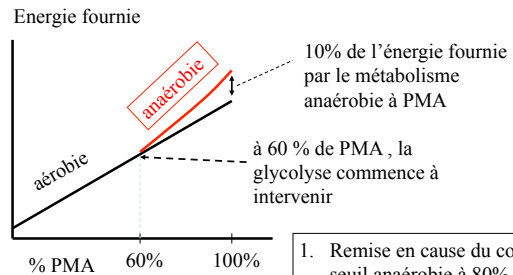




Le coût énergétique de la course augmente parce que :

1. La transformation de l'énergie chimique en mécanique est moins efficace à vitesse élevée
2. Parce que les muscles se contractent à une vitesse trop élevée

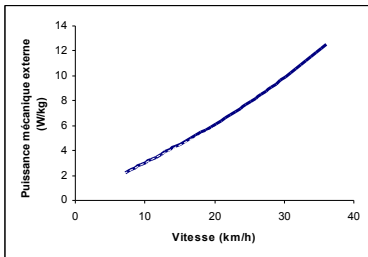
## 2. Contribution du métabolisme anaérobie



Medboe et al., 1990

1. Remise en cause du concept de seuil anaérobie à 80% de PMA
2. Remise en cause de la signification des tests de VMA

## 3. ↑ marquée de la puissance mécanique externe



↑ phase de freinage  
↓  
↑ puissance cinétique dans la phase de poussée

• Le coût énergétique augmente avec la vitesse en partie parce que :

1. Plus on court vite, plus les phases de freinage sont marquées
2. Plus les phases de poussée réclament de l'énergie

## 4. Puissance interne

$W'_{int}$  : mouvoir les segments corporels par rapport au centre de masse

$$W'_{int} = 0.1 f v (1 + (d/(1-d)))$$

Cste caractéristiques anthropométriques

Fréquence d'enjambée

Vitesse de déplacement

Temps de contact sur la période du cycle



- ⇒  $W'_{int}$  interne augmente avec la vitesse
- ⇒  $E^*$  métabolique augmente avec la vitesse

Minetti, 1998

## 5. ↑ Puissance liée aux résistances aérodynamiques

R. aérodynamique ↑ avec  $v^2$

(Dimension d'une force)



( $P = F V$ )

P aérodynamique ↑ avec  $v^3$

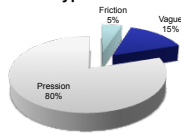


↑ de P aérodynamique participe à ↑ de  $P_{métabolique}$



## En actif

Différents type de trainée à 1m/s



Différents type de trainée à 2 m/s

