

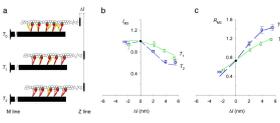


Étienne-Jules Marey (1830-1904), planche extraite de La Machine animale, chronophotographie

M1 UE5 E4 Locomotion, 8h

robin.candau@umontpellier.fr

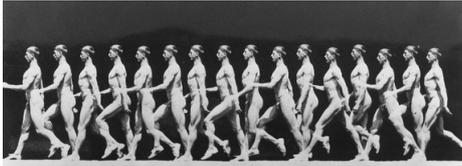
6 articles à analyser



1. Principales observations notamment une illustrée au travers d'une figure → Ce que l'on doit retenir?
2. Significations et applications pratiques → Comment s'en servir?
3. Méthodes employées → Comment les mesures ont été effectuées?

Pourquoi la course est 2 fois plus coûteuse que la marche?

2 J.kg⁻¹.m⁻¹



4 J.kg⁻¹.m⁻¹



Étienne-Jules Marey (1830-1904), planche extraite de La Machine animale, chronophotographie

Energie dissipée

- Coût énergétique de la course : 4 J.kg⁻¹.m⁻¹
Associée à des phases de freinage où l'énergie est dissipée sous forme de chaleur → existence d'un travail cinétique important → fonction d'amortissement prégnante
- Coût énergétique de la marche : 2 J.kg⁻¹.m⁻¹
Peu de freinage → fonction d'amortissement optimisée




Rôle de la fonction d'amortissement dans la locomotion humaine et les APS?

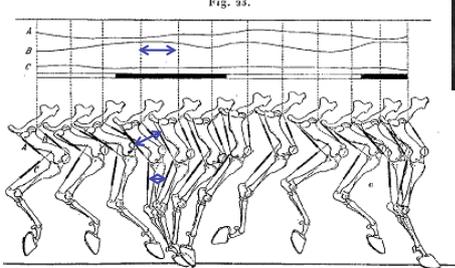
La locomotion terrestre humaine comme animale, est régulée par deux grandes fonctions de l'appareil locomoteur en plus du mécanisme essentiel de production de force :

1. Fonction de raideur
2. Fonction d'amortissement




Fonction de raideur, pré-sentie dès 1899

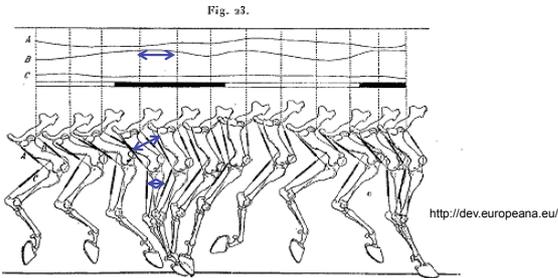
Fig. 33.



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

<http://dev.europeana.eu/> JE Marey, 1899. La Chronophotographie

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

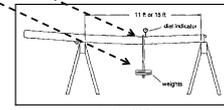


Attitudes du squelette et changements de longueur des muscles. — En haut courbes des changements de longueur des divers muscles.

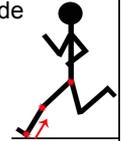
JE Marey. 1899. La Chronophotographie

Définitions

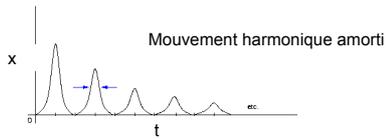
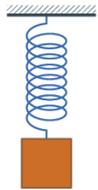
- La raideur est définie comme une résistance à la déformation : $k = \Delta F / \Delta x$



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



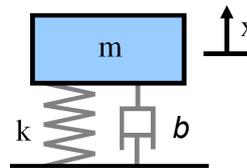
Paradigmes mécaniques Modèle masse ressort



- 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

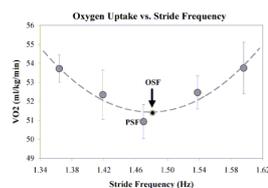


$$Q = \frac{m \sqrt{\frac{k}{m}}}{b}$$

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

Définition

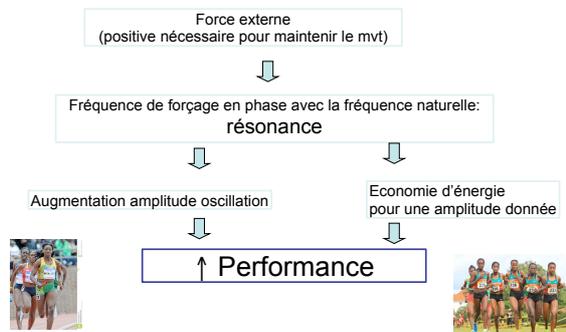
La résonance survient lorsque la fréquence de forçage exercée sur le système oscillant est en phase avec la fréquence naturelle du système

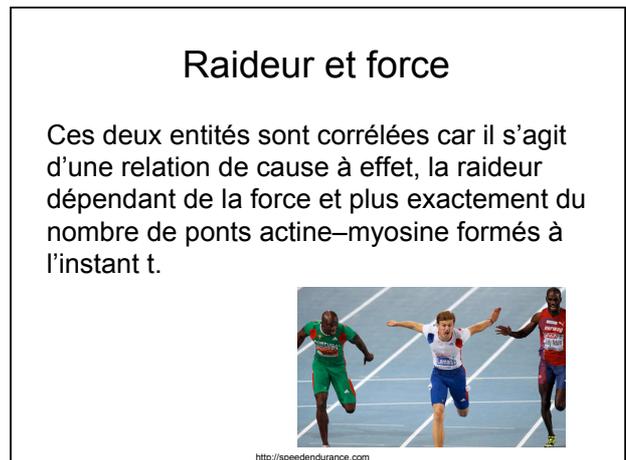
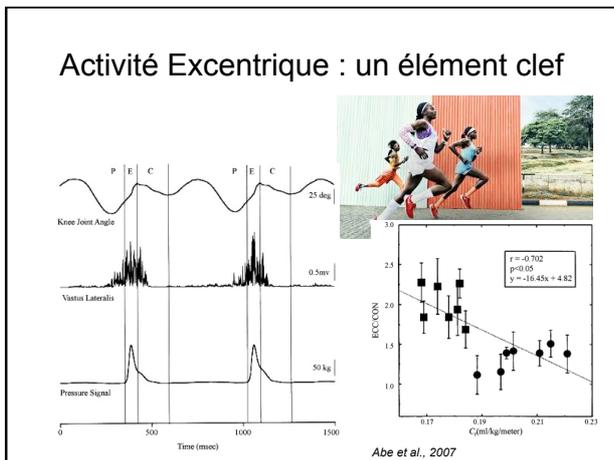
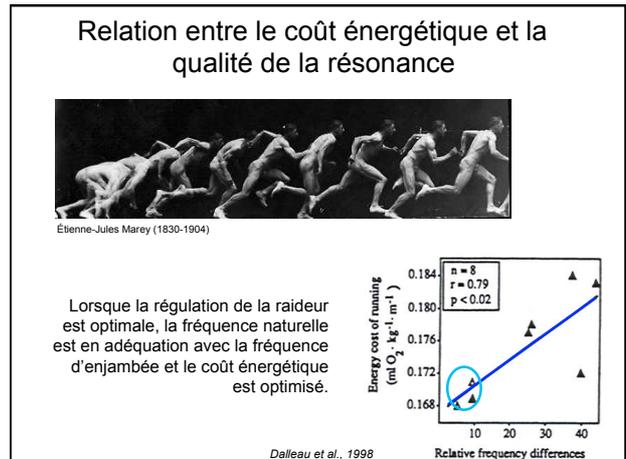
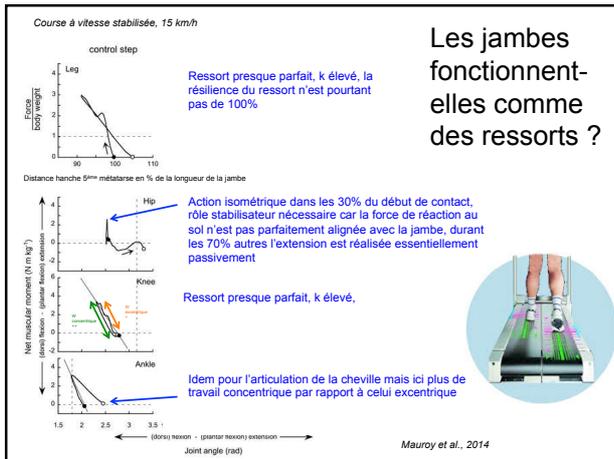


Hunter and Smith, 2007.

Résonance

Mouvement amorti





Questions

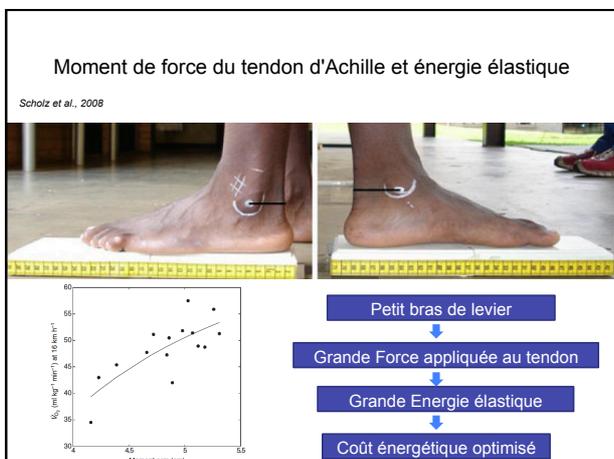
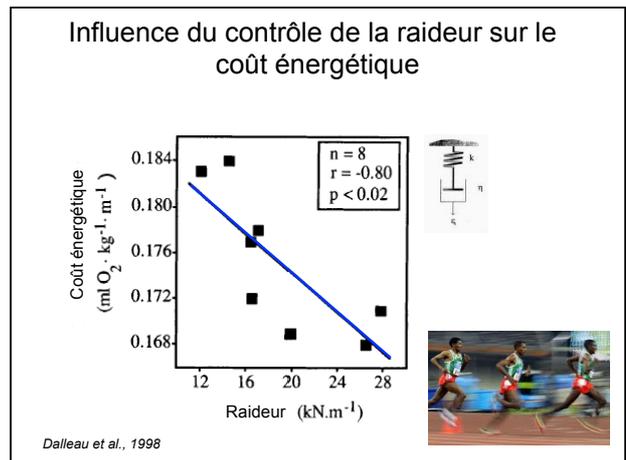
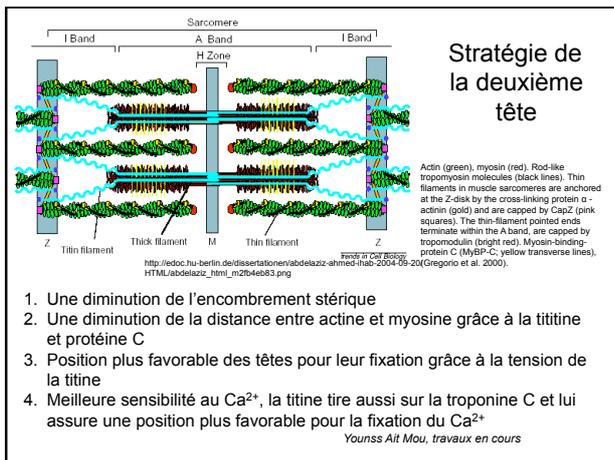
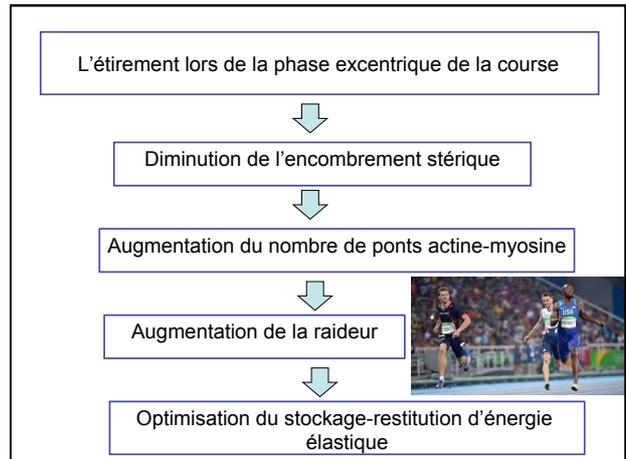
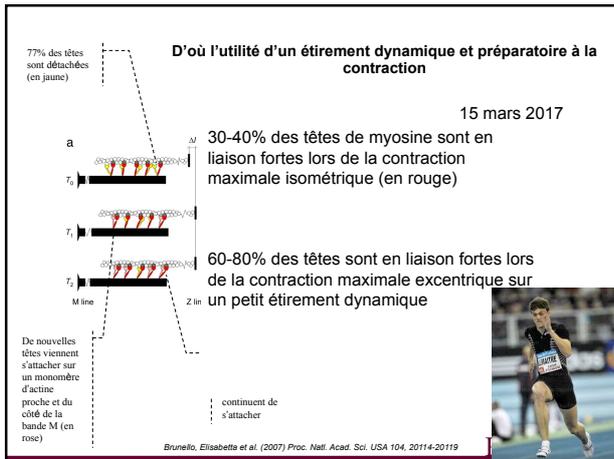
Bonjour, je suis en ppr et suite à votre cours en tronc commun sur la locomotion, j'ai quelques questions :

- Je n'ai pas bien compris quel était le concept de fréquence naturelle. Et comment l'athlète peut ajuster sa fréquence de course à celle-ci.
- Une deuxième question par rapport à l'excentrique: pourquoi l'activité emg est moins importante lors d'un travail excentrique que concentrique, est-ce que ce serait dû au travail de la composante élastique. Merci du temps accordé. Cordialement

Fréquence naturelle

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

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



Variable majeure

- 58–81 % de la variance du coût énergétique expliquée par le moment de force du tendon d'Achille
- corrélée avec la longueur de la tubérosité du calcaneum

2ème élément d'explication

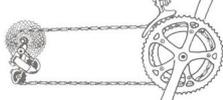


Kenenisa Bekele détient depuis 2005 le record du monde du 10 000 m en 26 min 17 s 53.

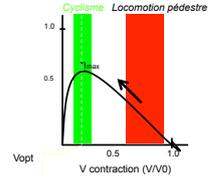


Petit calcanéum

Gros développement



Rendement musculaire



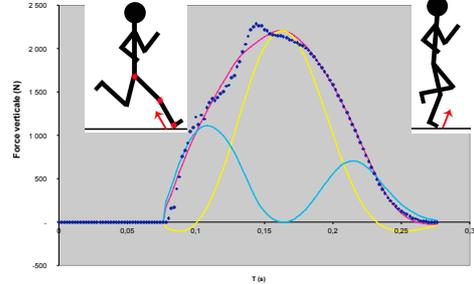
Mesure de la raideur

F Raideur = $k \cdot x$

F Amortissement (b, v)

F désigne la fonction en N, k est la raideur N/m, b est la constante d'amortissement en N/(m/s) et v est la vitesse de compression du ressort (ou d'éirement des muscles extenseurs en m/s)

Fonction de raideur et d'amortissement lors de la course



k amortissement

m

x

Raideur de chacune des articulations

k est la raideur N/m, *b* est la constante d'amortissement en N/(m/s), *m* est la masse et *x* est la position du centre de masse par rapport à sa longueur d'équilibre en m

Ressort presque parfait, k élevé

Amortissement

Travail relativement important assuré par de tous petits muscles

Mauray et al., 2014

Passage de haies et obstacles

Mauray et al., 2013

control step step -1 step 0

Force body weight

Distance hip - gth meta (% leg length)

Leg and force orientation (% leg length)

Step -1

Step 0

Energie cinétique

Energie potentielle

Energie totale

Transfert Energie potentielle à cinétique

Transfert Energie cinétique à potentielle

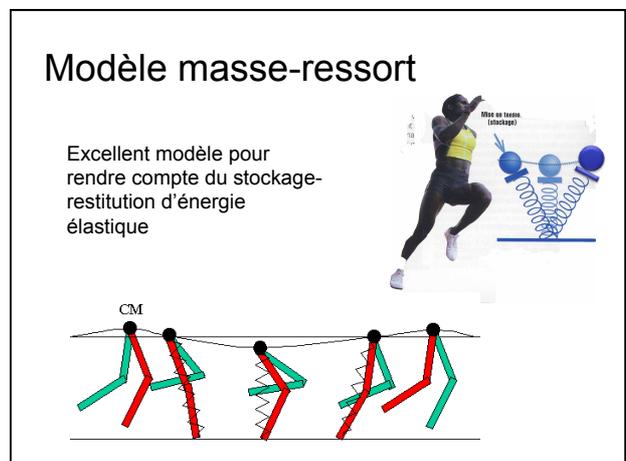
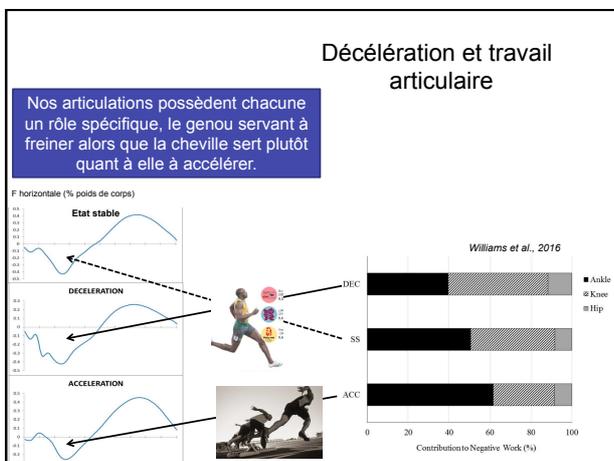
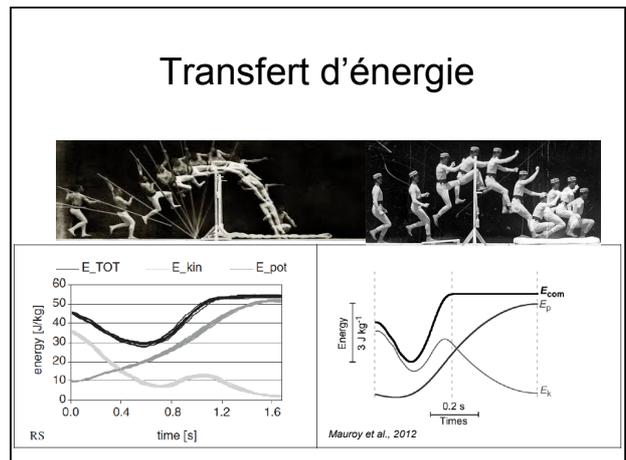
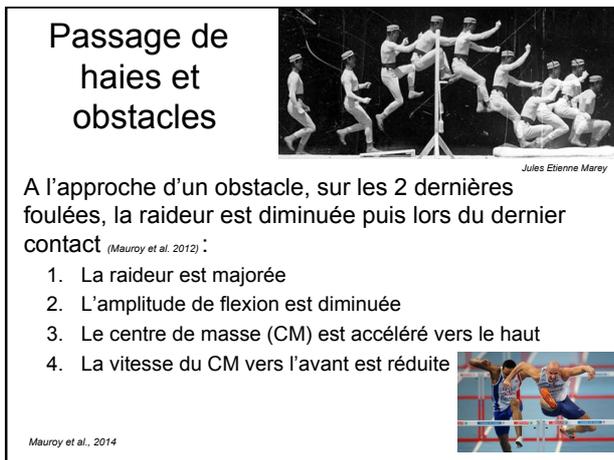
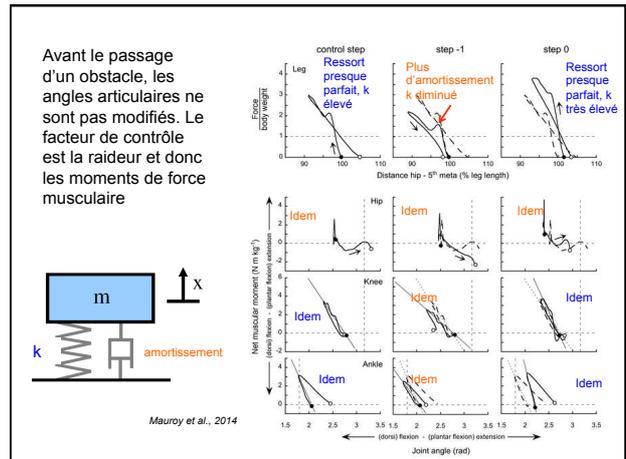
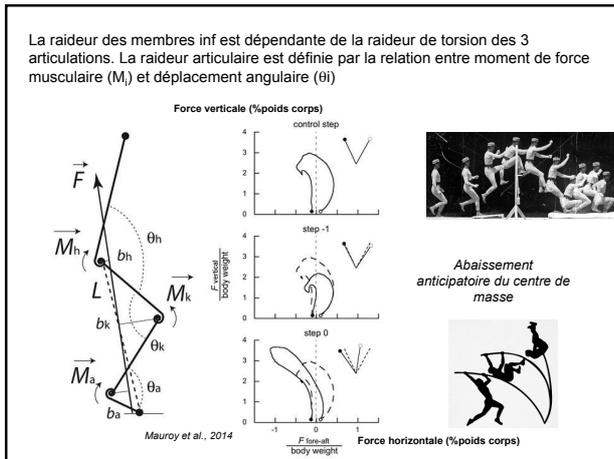
Pour franchir l'obstacle le travail est effectué par la hanche (step 0). Idem pour courir plus vite ou en montée

Le travail net est nul (sauf pour step 0) mais le travail articulaire net n'est pas nul : négatif pour la hanche et le genou et positif pour la cheville.

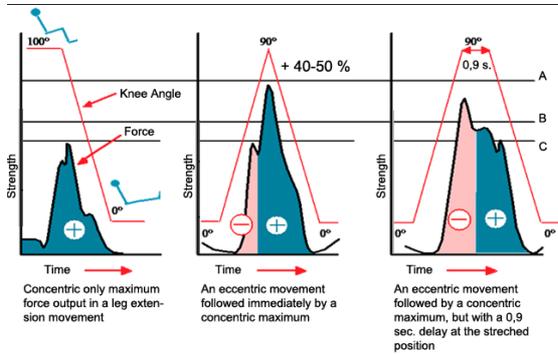
Mauray et al., 2014

Rappel

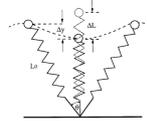
- $W = \Delta \text{Energie}$
- $\eta = W_{\text{mécanique}} / E_{\text{consommée}}$
- Où $\eta = 0,5 = 1/2$
- $W_{\text{mécanique}} = E_{\text{consommée}} \cdot \eta = E_{\text{consommée}} / 2$



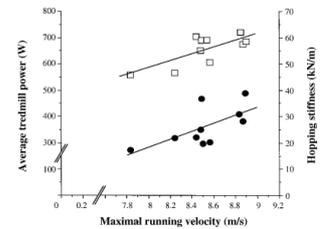
Augmentation de performance



Raideur facteur de la performance en sprint

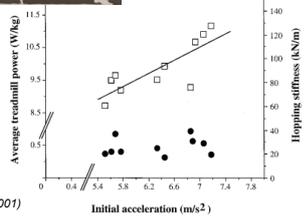


La raideur (pt noirs) est corrélée avec la vitesse maximale atteinte



Chelly et Denis (2001)

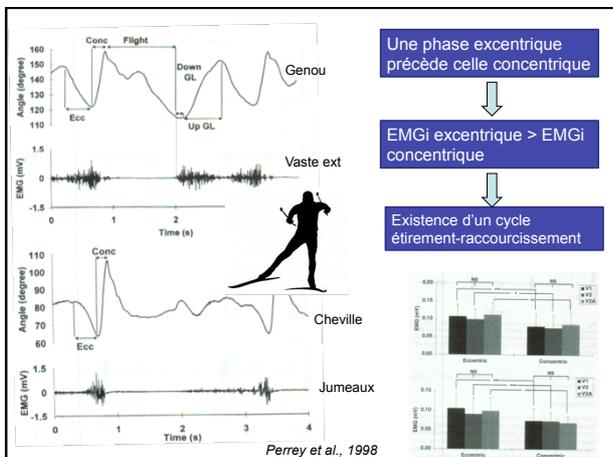
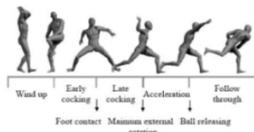
L'accélération initiale indépendante de la raideur (pts noirs) est essentiellement liée à la puissance de l'athlète (pts blcs)



Chelly et Denis (2001)

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)



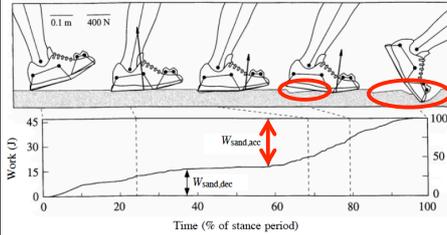
<http://thredist.fr/media/cache/database/muses/icon/sport>

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).

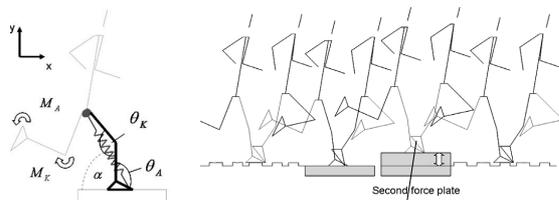
Locomotion sur le sable

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.

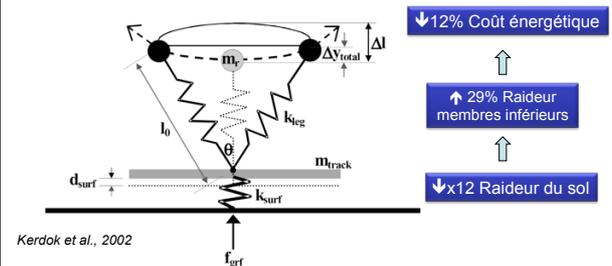
Franchissement d'une marche



La raideur est diminuée de telle sorte que la trajectoire du centre de masse soit la moins possible perturbée Muller et al., 2010

22/3/17

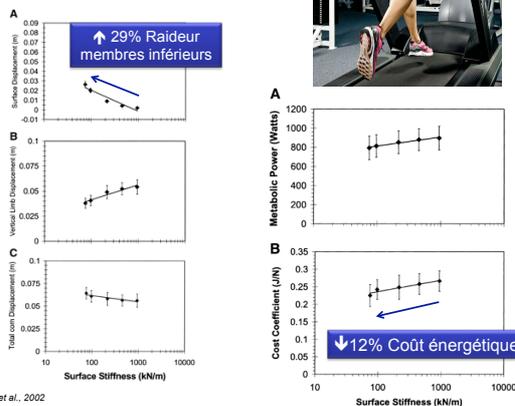
Sol compliant



Kerdok et al., 2002

Spring-mass model representing a runner's leg in contact with a compliant surface. l_0 , Uncompressed leg length; m_r , mass of the runner represented as a point mass located at the hip; Δy , total, maximum vertical displacement of the center of mass; Δl , maximum compression of the leg spring; θ , angle of the leg spring at first ground contact; k_{leg} , spring constant of the runner's leg; m_{track} , effective mass of the running surface; d_{surf} , amount the running surface deflects; k_{surf} , spring constant of the running surface; and f_{grf} , vertical ground reaction force.

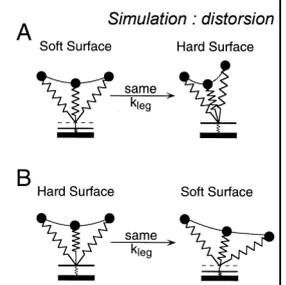
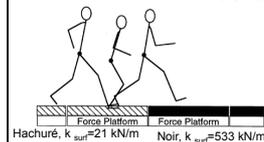
Augmentation de la compliande du sol



Kerdok et al., 2002

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

Ferris et al., 1999

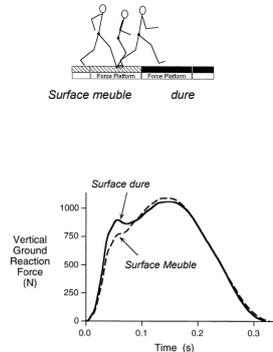


Une régulation de la raideur est nécessaire

Facteur essentiel de contrôle : la raideur

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

Ferris et al., 1999



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 fléchie au moment de la pose du pied pour un moment de force musculaire donné. Inversement la raideur est plus grande jambes tendues

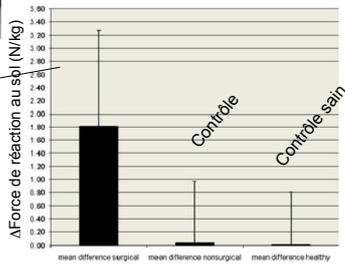


Variabilité des forces de réactions au sol après réparation du ligament croisé antérieur



60s Chaussures dures puis 60s chaussures avec semelles molles ajoutées

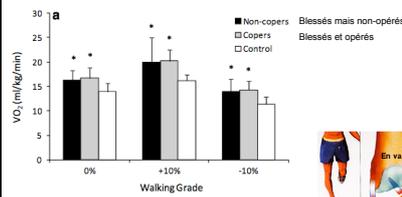
Difficulté à maintenir les forces de réaction stables au sol en raison d'une absence d'ajustement des fonctions d'amortissement et de raideur



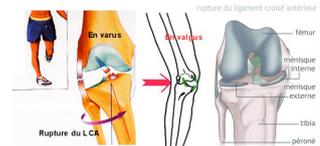
Hackney et al., 2010

Altération du Ligament Croisé Antérieur

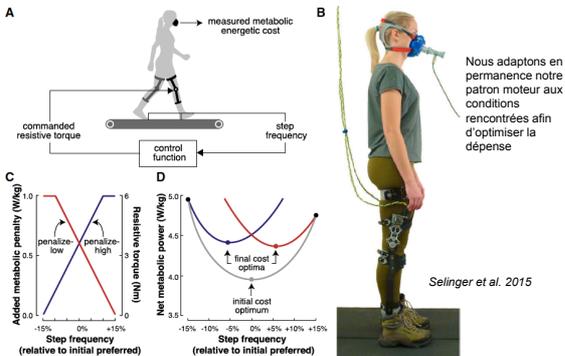
Le coût énergétique de la marche est majoré 23% et 18% respectivement pour les sujets opérés ou ceux qui ne l'ont pas été et cela par rapport à un groupe contrôle et cela quelque soit la pente (Iliopoulos et al., 2015)



Doit-on opérer ?



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



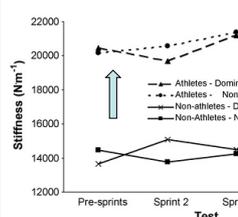
Selinger et al. 2015

Effet de l'entraînement et de sprints répétés

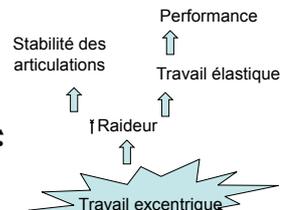
LES MAKEY (photographies)

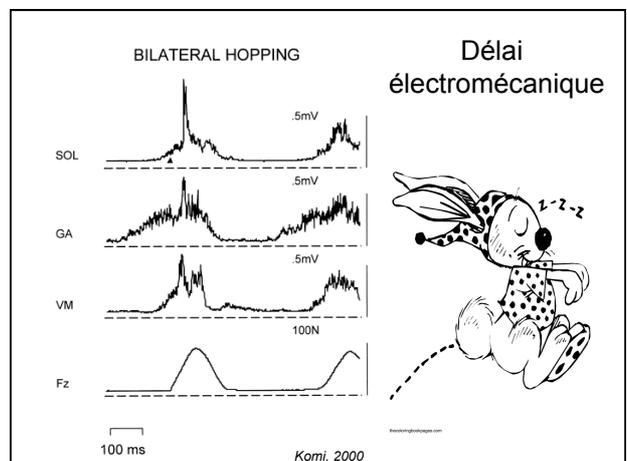
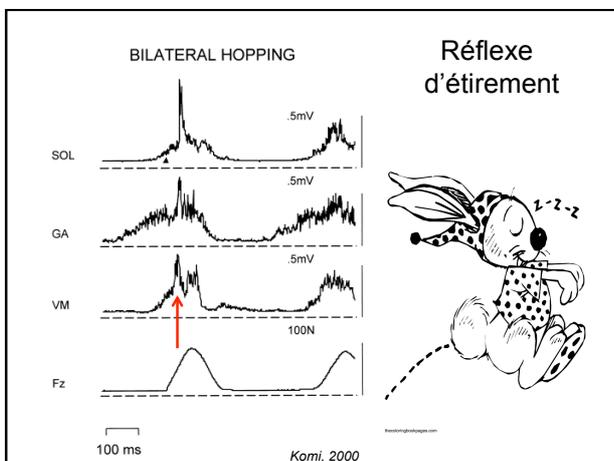
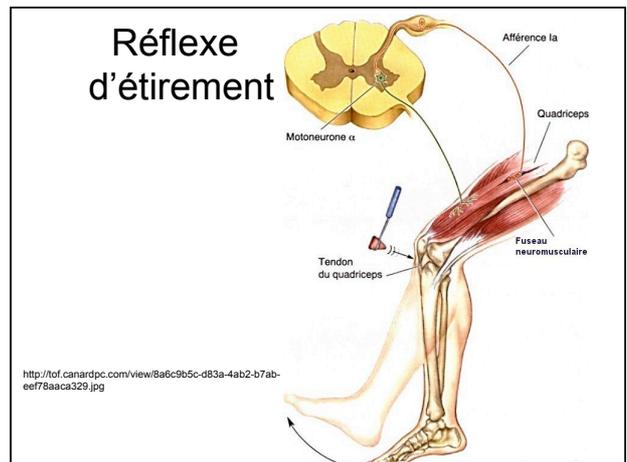
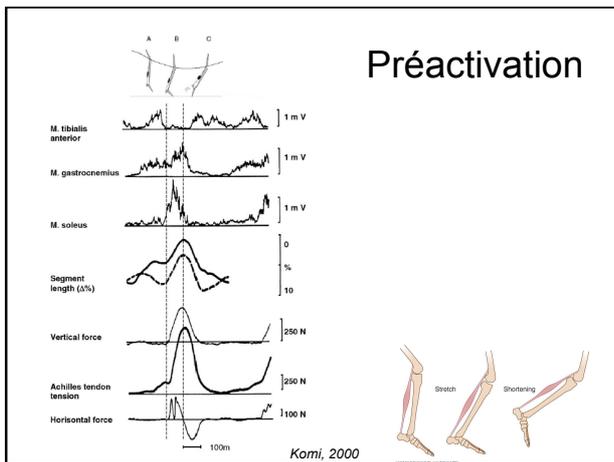
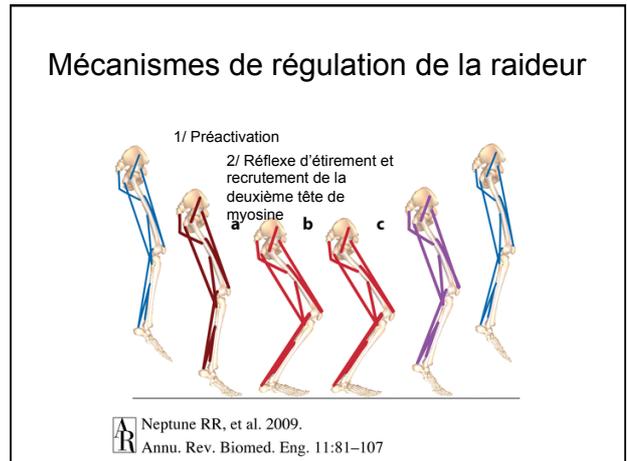
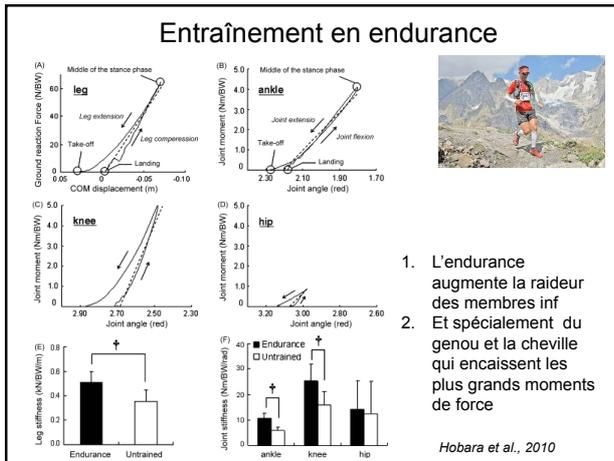


35 m, récup 30s



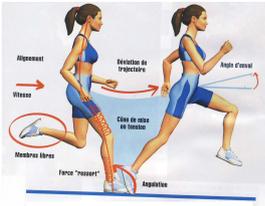
Clark, 2010





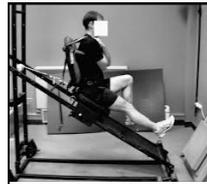
Réponse mécanique : Sprint vs. Course de fond

Sport et vie



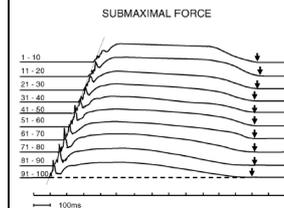
- Dans le sprint, délai électromécanique de 50 ms => potentiation de la contraction dans la phase de poussée

- 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



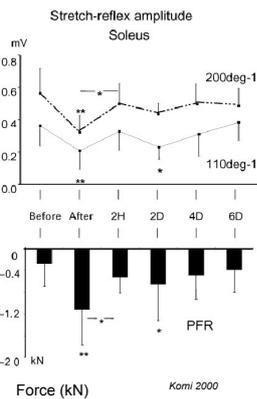
Effet de la fatigue sur le contrôle de la raideur

(Gollhofer et al., 1987).



- ↓ de la résistance à l'étirement
- ↓
- ↑ de la préactivation pour tenter de compenser
- ↓
- ↓ du travail élastique
- ↓
- ↑ Travail des composantes contractiles

Sensibilité réflexe à l'étirement

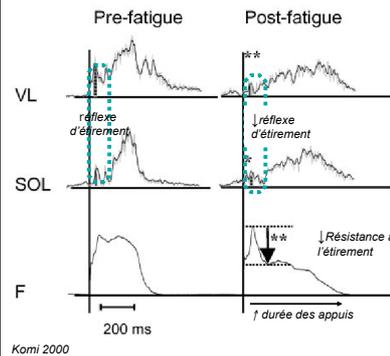


Après un marathon



- Le réflexe d'étirement est altéré immédiatement après
- 2 J → phase inflammatoire
- 4 J → récupération de la sensibilité à l'étirement

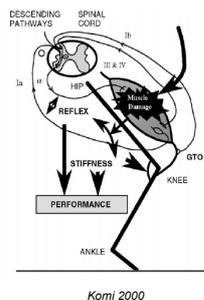
↓ de la commande motrice et des forces



- Inhibition par les nocicepteurs
- ↓
- ↓ EMGi
- ↓
- ↓ de force
- ↓
- ↑ durée des appuis

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



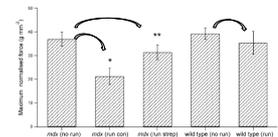
Mécanismes moléculaires impliqués?

Actions excentriques

Étirement des membranes et des pores spécifiques

Perméabilité au Ca²⁺

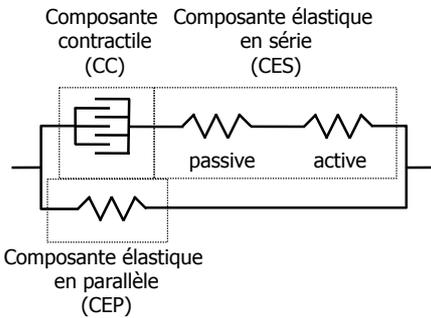
Protéolyse (protéases, ROS, phospholipase A2)



Valable chez la souris « myopathe ». La septomicine un bloqueur spécifique des pores calciques contrearre ces mécanismes délétères (Whitehead et al., 2006)

↓ force maximale isométrique

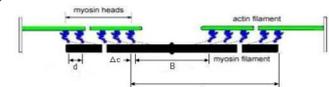
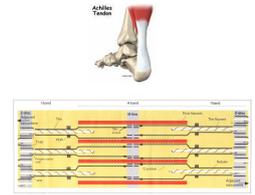
Modèle mécanique du muscle



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

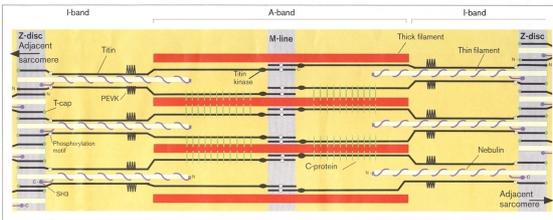
Composantes élastiques en série

- Raideur passive
 - Tendon
 - Titine
 - Enveloppes conjonctives
- Raideur active
 - Pont actine - myosine



La Titine (Cytosquelette endosarcomérique)

La titine est mise sous tension lors d'étirements passifs. Elle est la principale responsable de la tension passive.

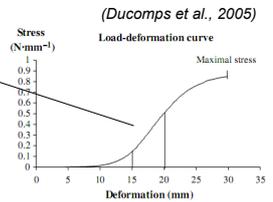


Composante élastique passive:

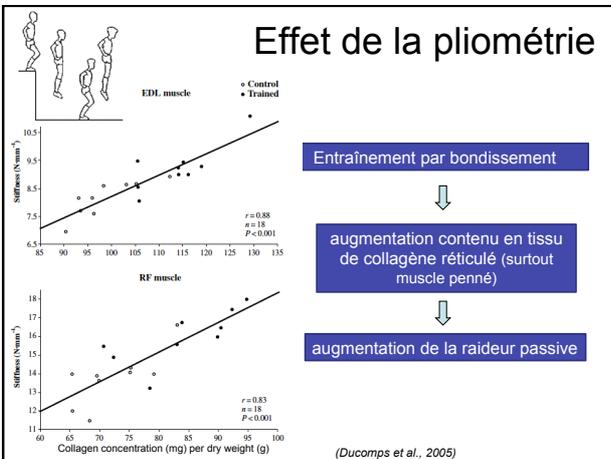
La composante élastique → ≈50% de l'élasticité sérielle : les tendons et le tissu conjonctif

Les tendons sont plus résistants que les ligaments bien que peu vascularisés mais la répétition d'activités chez les sportifs entraîne une fragilisation du tendon qui peut alors se déchirer ou se rompre entièrement.

Mesure de la raideur passive (qui contrôle l'amplitude du mvmt en situation écologique, i.e. la souplesse)

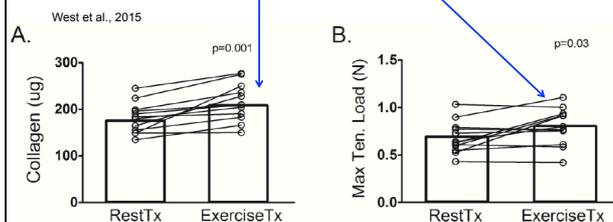


Effet de la pliométrie



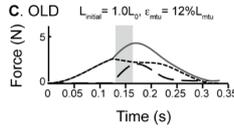
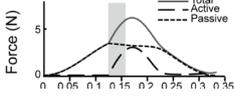
Les modifications du milieu cellulaire peuvent déterminer la croissance du collagène des ligaments

Sur culture cellulaire et reconstitution de ligaments, ajout de sérum d'athlètes qui viennent de s'entraîner en résistance



Effet de l'âge sur les tendons

Danos et al., 2016



Diminution des forces et puissances et diminution de l'énergie stockées dans les éléments élastiques séries



Rupture du tendon d'Achille



- Blessure la plus fréquente dans les APS
- Augmentation de 2/100 000 à 12/100 000 avec l'âge

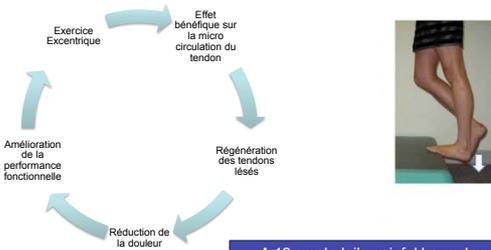
- 2 à 12 fois plus fréquente chez les hommes
- Survient typiquement vers 40-50 ans



Hess, 2010



Rôle préventif de l'exercice régulier et rôle bénéfique de l'excentrique sur la tendinite du tendon d'Achille

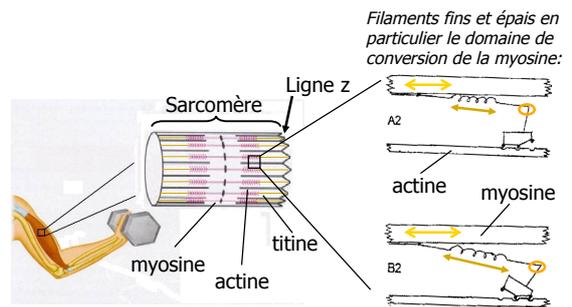


A 12-week daily painful home-based eccentric training regimen was initiated (3x15 repetitions per tendon and day), 2 s each position with straight knee only.

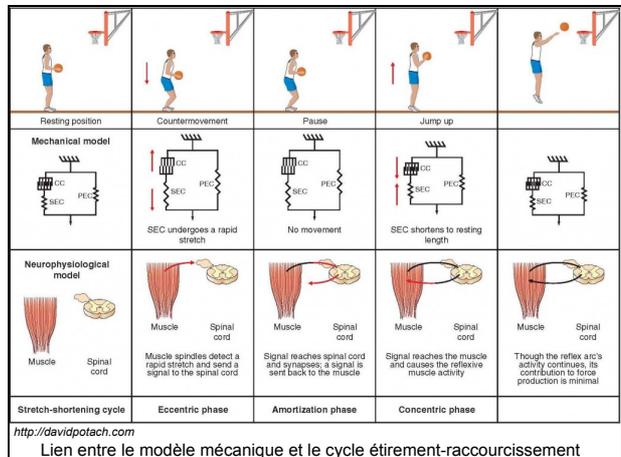
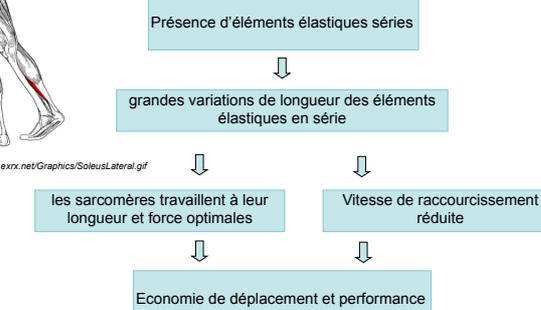
Knobloch 2006

Composante élastique active

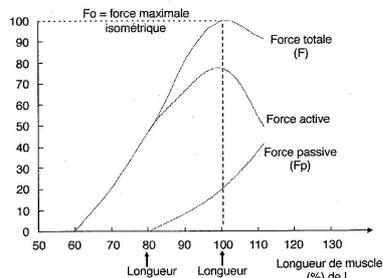
au sein même de l'unité contractile et participe à hauteur de 50% dans l'élasticité sérielle totale



Elasticité musculaire : conséquence fonctionnelle

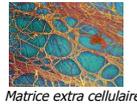


Relation Force-Longueur



Longueur optimale du muscle (et de ses sarcomères)

Composante élastique parallèle

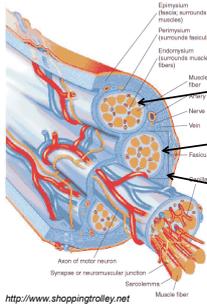


Fibre de collagène plus résistante que l'acier à poids égal



- les enveloppes conjonctives → matrice extra cellulaire constituée de :
 - fibres de collagène (une glycoprotéine fibreuse, protéine la plus abondante dans l'organisme)
 - protéoglycane (combinaison d'une protéine et d'un glycosaminoglycane)
 - élastine

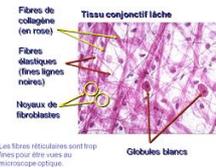
Le tissu conjonctif



3 types de structures :

- Endomysium (autour des fibres)
- Perimysium (autour des faisceaux de fibres)
- Epimysium (enveloppe l'ensemble du muscle)

Stabilisation et transmission des forces de la machinerie contractile jusqu'aux pièces osseuses



Tissu conjonctif

- Est composé de fibre de collagène (25% des protéines chez les mammifères) sous 2 formes : soluble ou « cross-linked »
- En plus grande quantité dans les fibres lentes
- Augmente avec la croissance, l'âge et l'entraînement en endurance, en résistance et la pliométrie

Altérations des propriétés élastiques du muscle



Effet de l'entraînement sur :

1. la composante passive en série (les tendons se renforcent)
2. la composante active en série (la force musculaire s'accroît)
3. la composante passive en parallèle (la matrice extracellulaire se renforce notamment lors d'un accroissement du nombre de fibre lente)

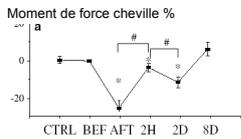
Autres facteurs de variations

- Température (augmentation de compliance, attention au type d'échauffement pour les activité explosive)
- Blessures (dégénérescence du collagène en plus de la composante contractile)
- Immobilité (mêmes mécanismes)
- Contexte hormonal (laxité chez la femme enceinte)



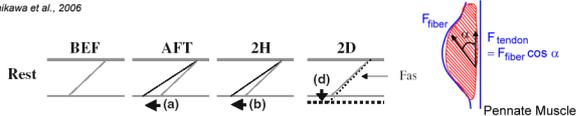
<http://www.calciomio.fr>

Modification de l'architecture du muscle avec la fatigue



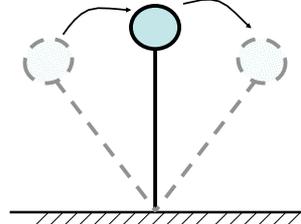
1. Fatigue métabolique, récup rapide
2. Gonflement du muscle => fibres en biais => ↓ raideur du muscle
3. Inflammation maximale à 2 j puis s'estompe

Ishikawa et al., 2006



Modèle du pendule inversé

Transfert de l'énergie cinétique en potentielle Transfert de l'énergie potentielle en cinétique

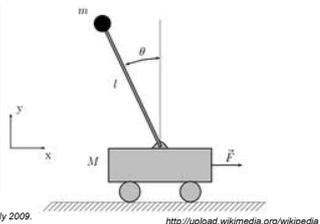


Optimisation des transferts d'énergie lors de la marche

Transfert d'énergie cinétique à potentielle

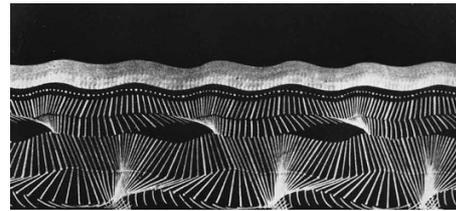


Science of movement
Chronophotography of dancer Ami Shulman walking, Montreal, July 2009.



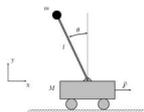
<http://upload.wikimedia.org/wikipedia>

Oscillations harmonique lors de la marche



L'homme à la marche, kinogramme d'après chronophotographie, Jules Etienne Marey

Optimisation des transferts d'énergie lors de la marche



Transfert maximal d'énergie cinétique à potentielle

• Les sujets souffrants de coxarthrose présentent → une fonction d'amortissement majorée → une réduction de moitié de la qualité de leurs transferts d'énergie → coût énergétique 2 fois supérieur → marche pénible

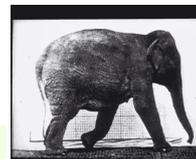
• Il est possible d'améliorer l'efficacité mécanique de la marche en optimisant les transferts d'énergie



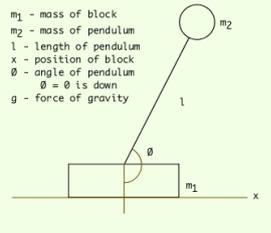
Modèle du pendule inversé pour le pas

Dès 1899 ...

J.E. Marey, 1899. La Chronophotographie

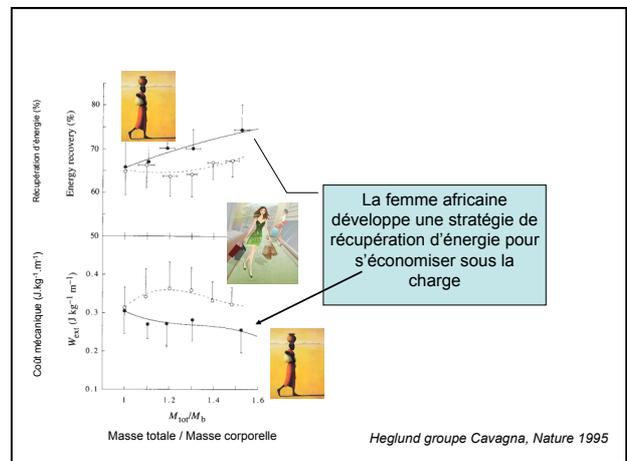
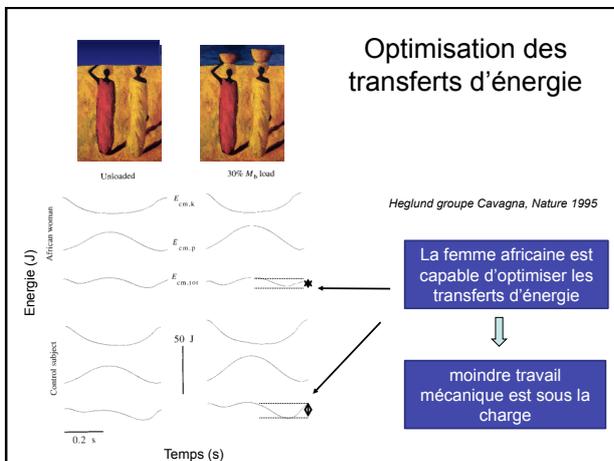
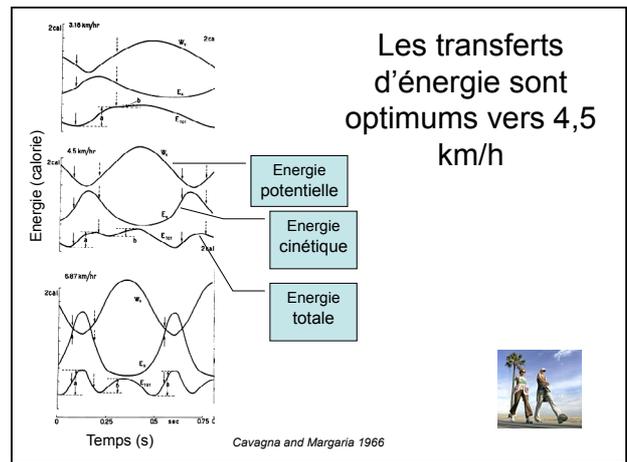
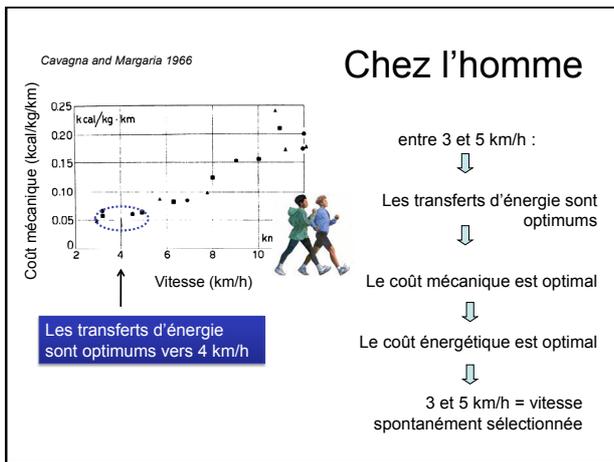
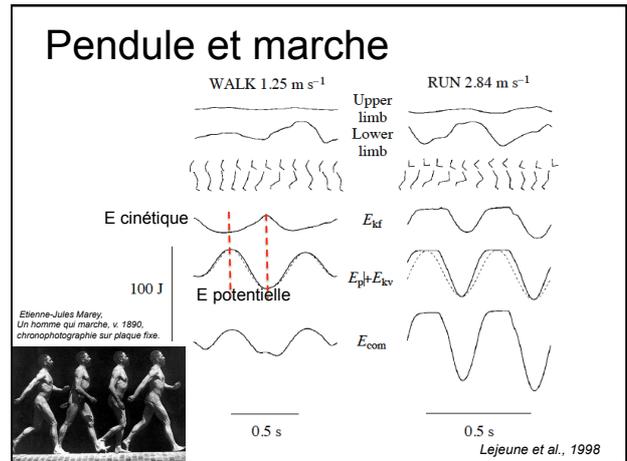
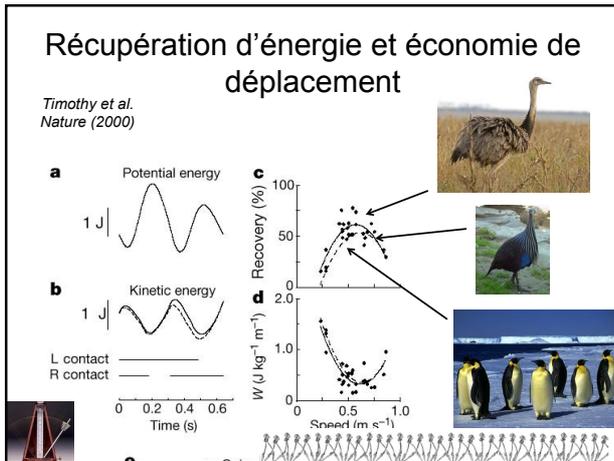


- m_1 - mass of block
- m_2 - mass of pendulum
- l - length of pendulum
- x - position of block
- θ - angle of pendulum
- $\theta = \theta$ is down
- g - force of gravity

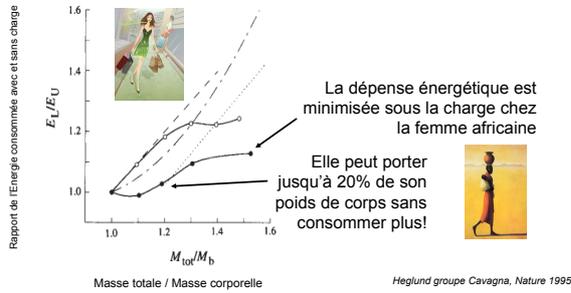


Le pas est associé à des transferts d'énergie d'un type d'énergie à l'autre





Économie d'énergie



Chez les premiers hominidés

Elisabeth Daynés, sculptrice d'hominidés

Lucy une vraie bipède plus efficace que les grands singes

Sellers et al., 2005

Marche pattes fléchies

A Reconstruction of Lucy

Robot / Pendule inversé



<http://www.aist.go.jp/MEI/mainlab/>

Capable de se déplacer sur le mode d'une pendule inversé en consommant peu d'énergie



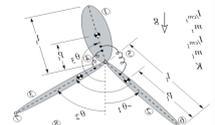
Une forme de validation du modèle

Un robot à zéro dépense d'énergie

- Double pendule inversé
- ↓
- Absence de collision
- ↓
- Absence d'amortissement
- ↓
- Récupération parfaite d'énergie
- ↓
- 0 dépense d'énergie



Reich, 2011 Nature



Gormes et Ruina, 2010

Evolution du cheval de Tchebychev

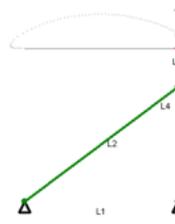
<https://youtu.be/MYGJ9jrbpvg> <https://youtu.be/HLKd1xXrie0>

Theo Jansen



Le « cheval de Tchebychev »

Mathématicien Russe 1821-94

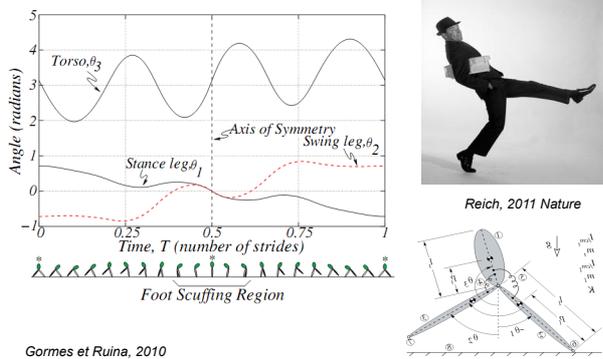


Conversion d'un mouvement de rotation en énergie cinétique de translation



Transfert d'énergie potentielle en énergie cinétique de translation

Un robot à zéro dépense d'énergie



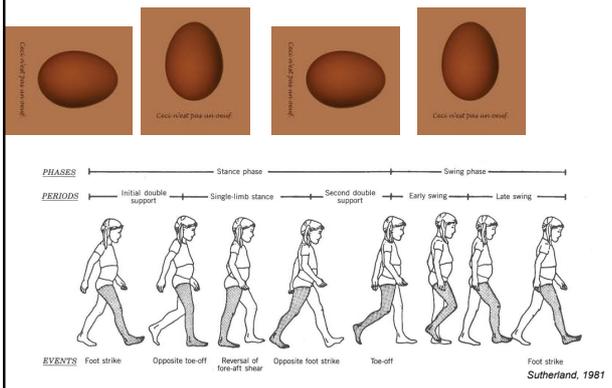
Modèle inspiré de la brachiation



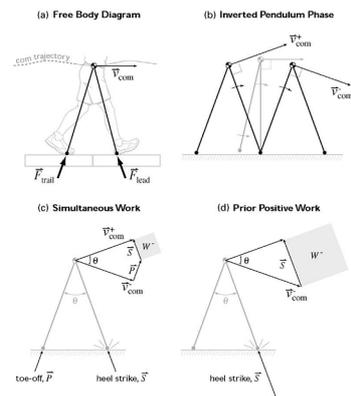
Le tilting du tronc optimise les transferts d'énergie en évitant les pertes lors des collision

« Ceci n'est pas un œuf » (Magritte)

« L'œuf qui roule »



Synthèse

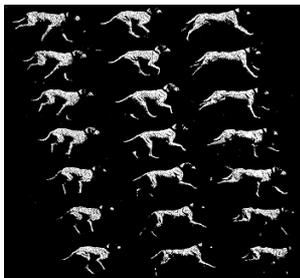


Double pogo stick :
1/ de la récupération d'énergie dans la phase de pendule (inversée)

2/ de la phase d'amortissement au début du contact du pied au sol et de la poussée concomitante de la jambe opposée

Donegan, équipe de Kram (2002)

Le galop



Série des attitudes d'un chien dans un pas de galop.

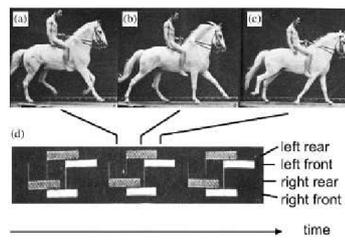
JE Marey, 1899. La Chronophotographie

Des transferts d'énergie plus une deuxième mode de récupération d'énergie



Le mode de locomotion pédestre le plus économique à haute vitesse

Le père de la biomécanique



Marey, 1874

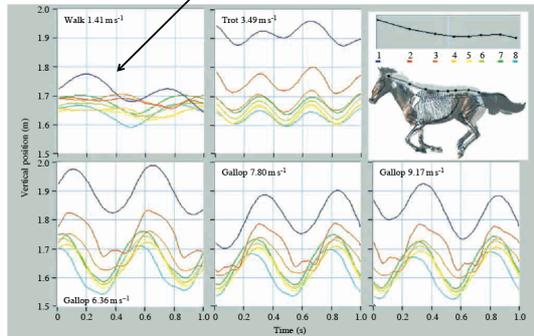


Mouvements de bascules



Les transferts d'énergie au galop avaient été pressentis déjà à l'époque

Transfert d'énergie d'un segment à un autre



JE Marey, 1899. La Chronophotographie

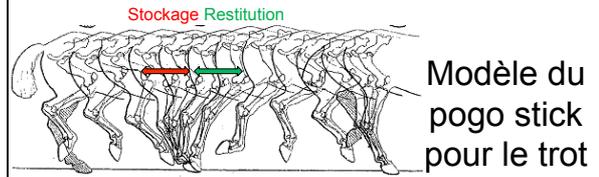


Fig. 25. — Attitudes du squelette dans le contour du membre postérieur.



Pour le trot, les énergies sont en phase, les transferts sont impossibles, c'est la récupération de l'énergie élastique qui prévaut ici

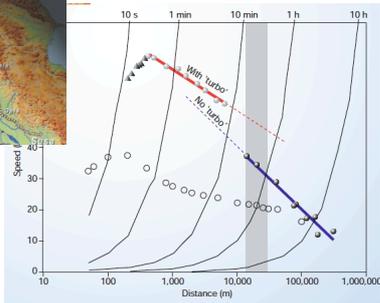
2750 km en 7 jours dès 599 avt JC!

Système sympathique → 30% de GR libéré par la rate → Ht jusqu'à 70% → jusqu'à 15L/H de sueur



Sans forcer 20-25 km (à 16 km/h) par cheval et 4 à 6 étapes par cavalier (66%VO2max pendant 90 km)

Minetti 2003 Nature



20-22 km/h le jour et 10-12 la nuit



Vitesses optimales pour le galop et le trot

Avec une VO2max de 100 ml/min/kg, 20 km/h → juste 69%VO2max → doit être remplacé au bout d'1H30

Table 1 Features of some horse-driven postal systems

Date	Mail system	Route	Distance covered (km)	Rider stations (n°)	Average speed (km h ⁻¹)	Number of stations	Network extent (km)
640 BC	Cyrus the Great, Persian Empire	Sardis-Susa	243	—	16.9	111	2,757
AD 618	Tang Dynasty, China	Network in China	20.0	5-6	13.9	1,297	82,500
AD 1250	Kublai Khan, Mongol Empire	Network in Asia	18.0-25.0	—	15.0-20.4	1,400	60,000
AD 1280	Mamlouk Sultanate, Egypt, Syria	Cairo-Damias	20.0-25.0	—	16.1	200	3,000
AD 1425	G. G. Visconti, Duke of Milan, Italy	Network in Europe	16.1	—	14.9	—	—
AD 1477	Louis XI, France	Network in France	28.0 ± 1.2 (n.d.)	—	13.8-16.5	72	2,000
AD 1860	Overland Pony Express, USA	St Joseph-Sacramento	20.1	4-5	15.5	167	3,169

Although express postal systems date back to 1700 BC (Hammurabi, only those based on day and night express relay riding for which reliable data and historical sources (ref. 2, and see supplementary information) are available, have been included. The Roman Carrier Paludarii (see 1), single file huge teams, are not considered here because of its slowness.¹

Minetti 2003 Nature

Au galop



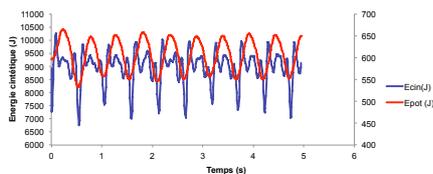
Décalage de phase sur les max



Transfert d'énergie partiel



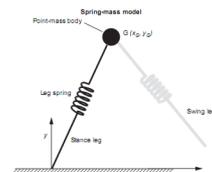
Allure économique et confortable à htes vitesses



Thèse Viry 2012

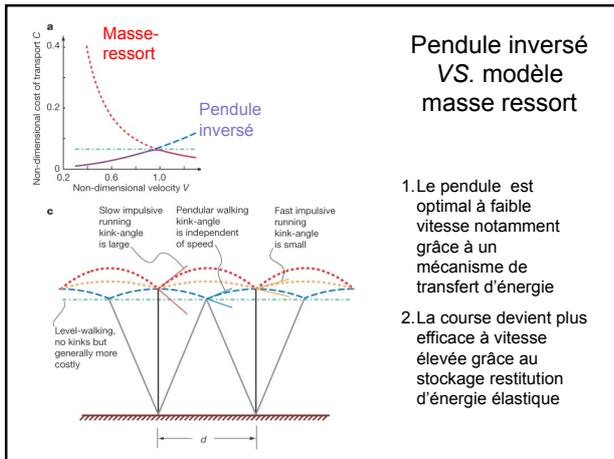
Modèle du double pogo stick pour le galop

JE Marey 1899. La chronophotographie



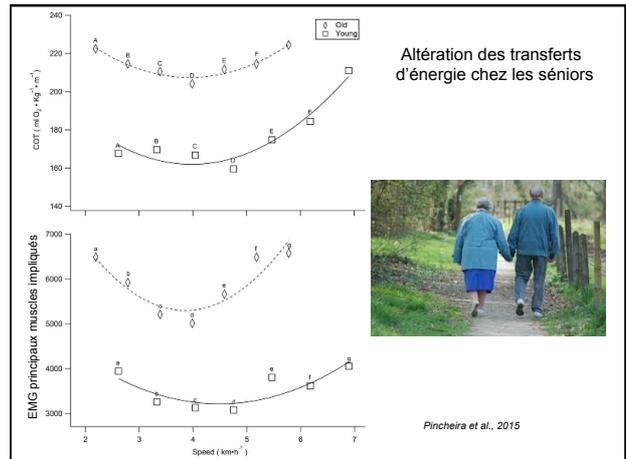
Srinivasan et al., 2008

Le galop est un mixte des 2 phénomènes de récupération d'énergie :
1. Transfert d'énergie
2. Récupération d'énergie élastique



Pendule inversé VS. modèle masse ressort

1. Le pendule est optimal à faible vitesse notamment grâce à un mécanisme de transfert d'énergie
2. La course devient plus efficace à vitesse élevée grâce au stockage restitution d'énergie élastique



Altération des transferts d'énergie chez les séniors

