



Action Nationale de Formation 2021
DR12 CNRS



« La Mécanique et le monde du vivant »

Apport de la biomécanique dans l'optimisation des équipements sportifs : application à la chaussure de course à pied.

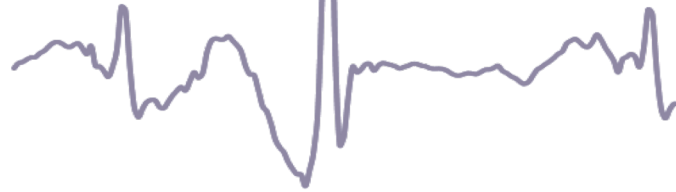


Frédérique HINTZY, MCF-HDR





Frédérique HINTZY
 MCF-HDR
 Laboratoire LIBM USMB
 Directrice LIBM
 frederique.hintzy@univ-smb.fr



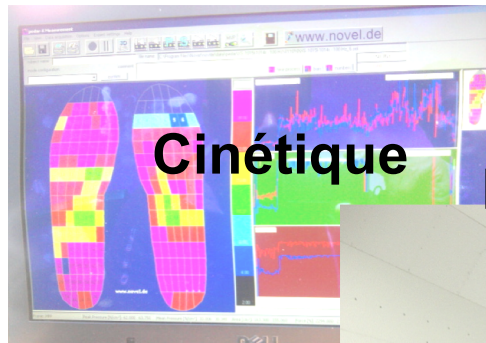
Applications

Mesures sur le terrain
in situ

Interface homme-
équipement



Optimisation de l'Efficiace Motrice

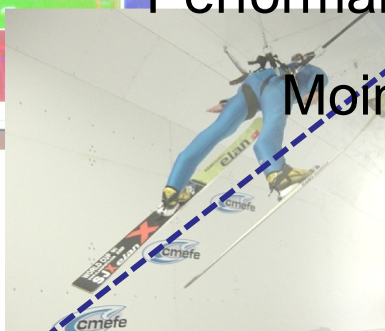


Cinétique

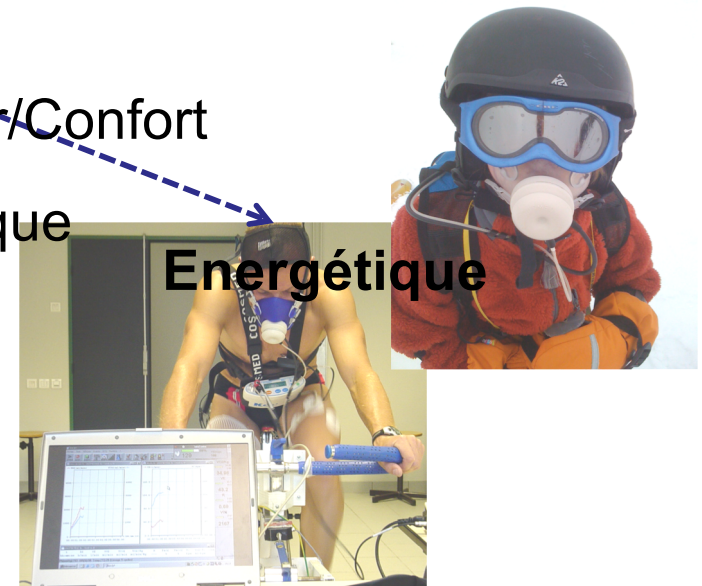
par des approches
 croisées

Performance Reussite Plaisir/Confort

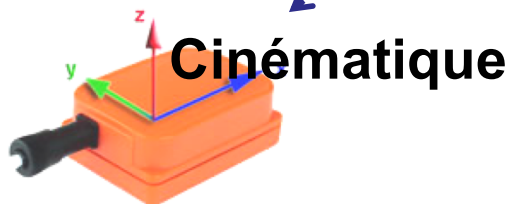
Moindre effort Sans risque



Neuro-musculaire



Energétique



Cinématique



Biomécanique ?

Etude des **propriétés mécaniques** des **organismes biologiques vivants**.

Traite des **relations existantes** entre les **structures et les fonctions**,

à tous les niveaux d'organisation du vivant

(de la molécule jusqu'à l'Homme, en passant par les muscles producteurs de puissance).



Biomécanique et optimisation des équipements sportifs ?



La performance sportive est multifactorielle

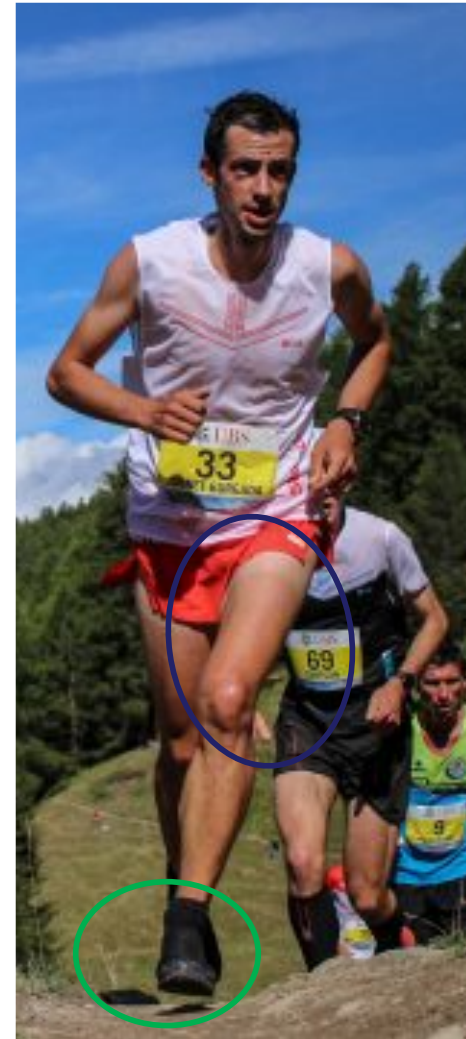


Application à la chaussure de course à pied

2 traileurs vainqueurs ...
mais des équipements différents



Julien Chorier



Kilian Jornet

Chaussures de trail différentes..... Pour une même activité ?



Julien Chorier



Points principaux sont communs :

- ✓ Réduire la masse
- ✓ Amortir



Kilian Jornet

La masse



La masse a une incidence directes sur la plupart des paramètres biomécaniques :

Travail externe

- La force Poids = $m g$
- Energie cinétique à développer : $1/2 m v^2$
- Energie potentielle à développer : $m g h$
- Somme des forces = $m a$

• Coefficient de raideur $K = F/\Delta x$

• Fréquence de résonance $= \sqrt{(k/m)} / 2\pi$

• Force de friction $F_f = \mu F_n$

Travail interne

• Inertie contre laquelle il faut lutter $I = m \cdot k^2$

• Force centripète à développer pour tourner = $m \cdot v^2 / r$

Et elle peut être négative ou positive pour la performance !

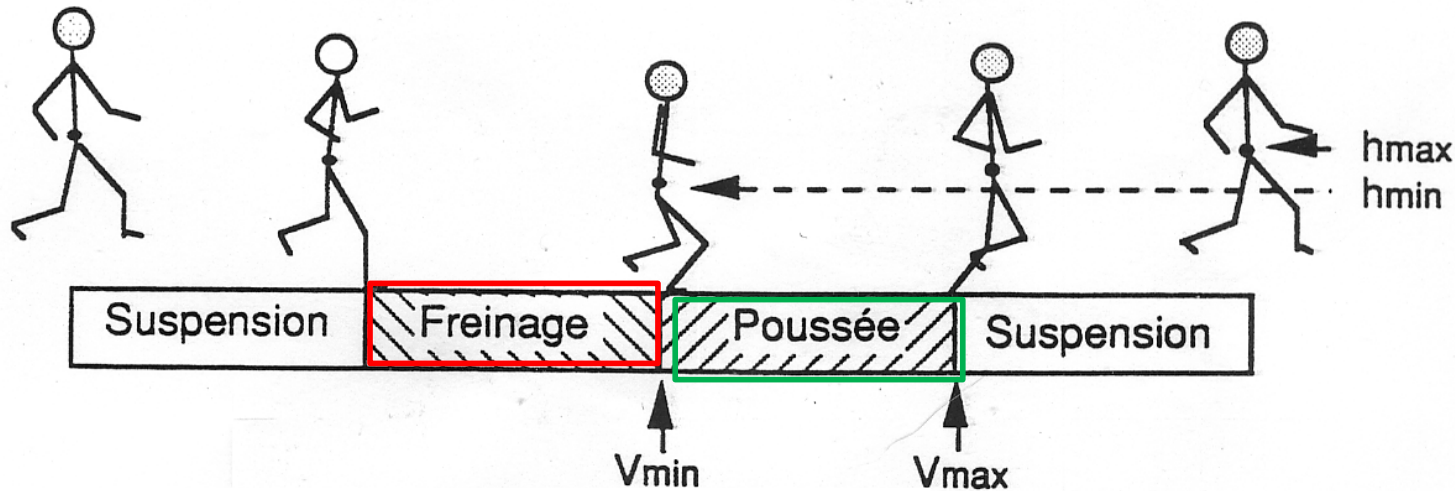
Masse et travail externe sur le plat



Couteux énergétique

Diminution de la vitesse horizontale ($\searrow E_c \frac{1}{2} m v^2$)

Abaisssement du centre de masse ($\searrow E_p m g h$)



Augmentation de la vitesse horizontale ($\nearrow E_c \frac{1}{2} m v^2$)




Élévation du centre de masse ($\nearrow E_p m g h$)

Variation d'énergie sur chaque appui, à multiplier par le nombre d'appuis.






Couteux énergétique

Masse, travail externe, dépense énergétique

 Dépense Energétique en J
(
 Dépense Energétique en J.kg⁻¹.)

 Masse

 Travail externe

 Coût Energétique (DE/vitesse) en J.m⁻¹
(
 Coût Energétique en J.m⁻¹.kg⁻¹.)



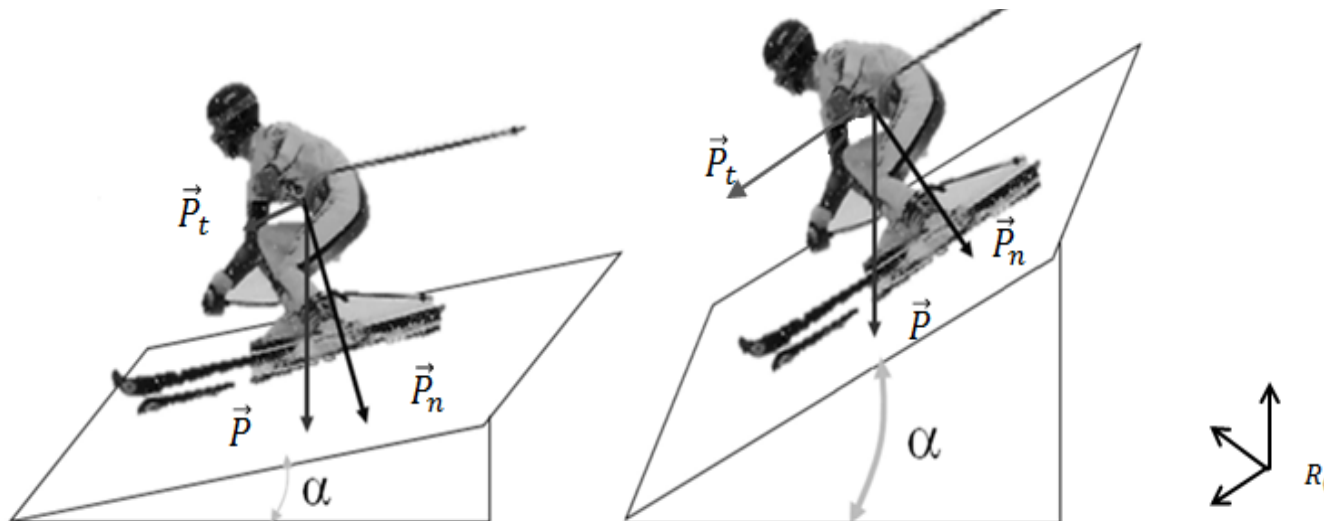
Paramètres et Unités ...

Masse et travail externe en pente (1/2)

Décomposition de P en une force normale au support ($P_n = mg \cos \alpha$) et une force tangentielle au support ($P_t = mg \sin \alpha$).

P_n : maintient le sujet en contact avec le sol (**F action-réaction, F_f**)

P_t : attire le sujet vers le bas de la pente : **énergie cinétique du sujet : poids moteur dans l'axe de pente**



Angle pente influence P_n et P_t :
angle augmente, P_n diminue et P_t augmente.

Travail externe en montée

Energie cinétique à développer ($\nearrow E_c \frac{1}{2} m v^2$)

Energie potentielle à développer ($\nearrow EP m g h$) pour l'appui et l'ascension du CM

La masse est obligatoirement couteuse en dépense énergétique : lutter contre la composante tangentielle « motrice » qui augmente avec la pente et qui est opposée au déplacement.



Couteux énergétique

Travail externe en descente

Abaissement du centre de masse (\searrow EP $m g h$)

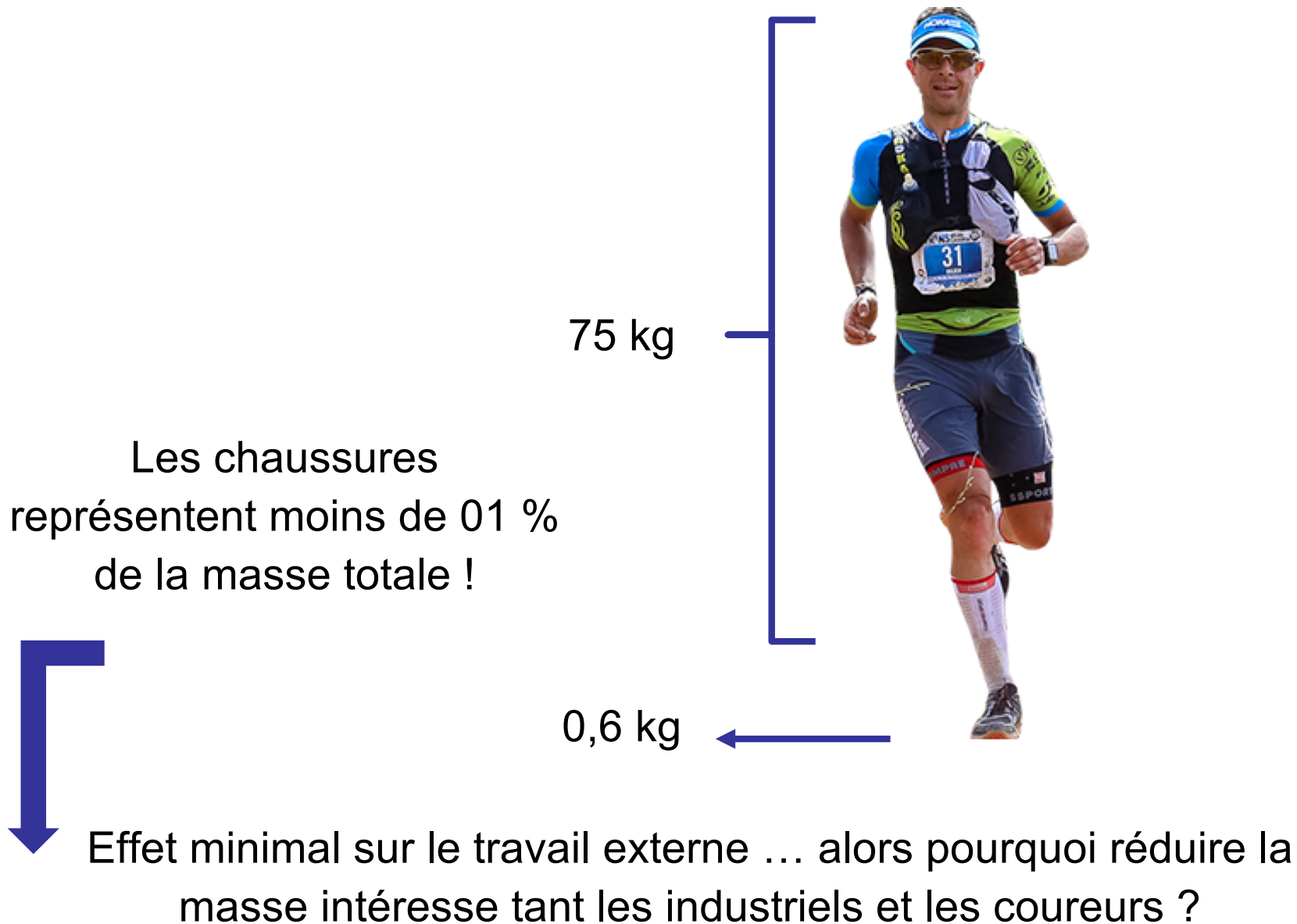
Déplacement du coureur obtenu par la composante motrice tangentielle du poids... donc pourrait être positif pour la performance !



Couteux énergétique,
sollicitation musculaire
importante (excentrique..)

Pente optimale -10%

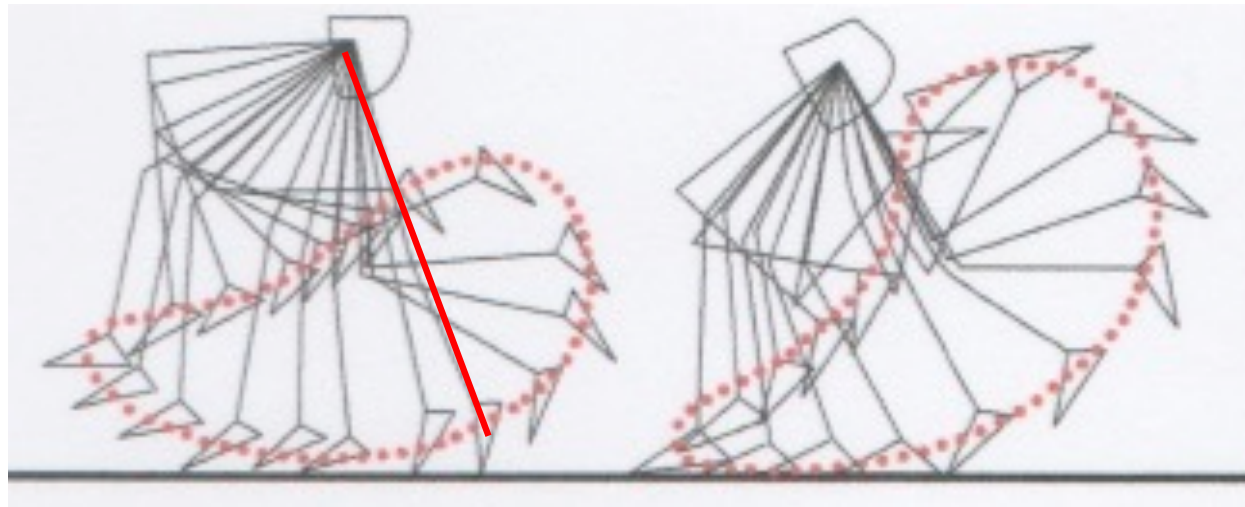
Influence de la masse de la chaussure ?



Travail interne

Energie nécessaire pour le déplacement 3D des segments par rapport au CM, sans production de travail externe du CM.

Inertie contre laquelle il faut lutter pour accélérer le pied $I = m \cdot k^2$



Masse et travail interne ... la chaussure

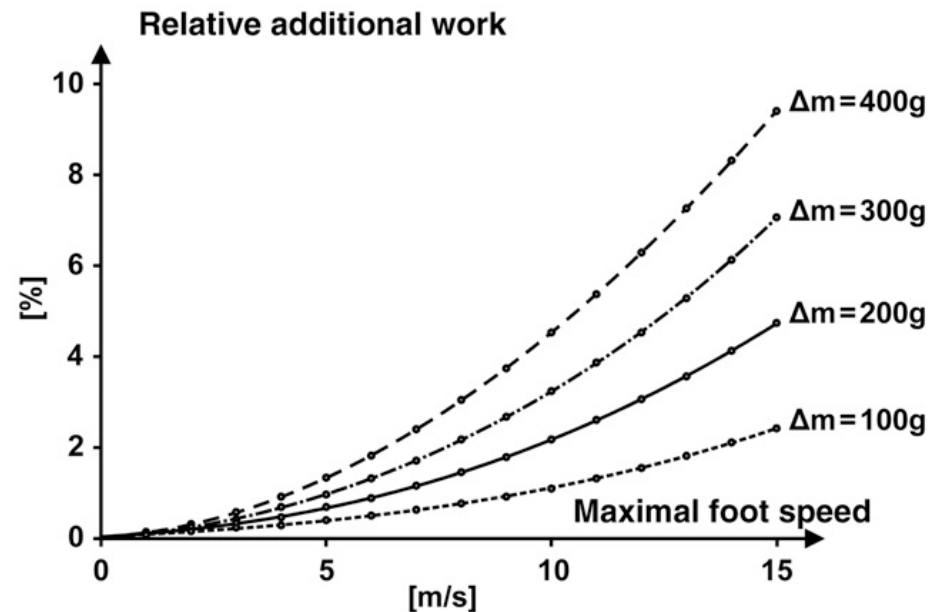
Masse de la chaussure est faible ... mais éloignée du CM !

↗ Masse

↗ Travail Interne

↗ Dépense Energétique sans production de travail externe !

Augmentation de l'énergie nécessaire supplémentaire avec la masse et avec la vitesse.



DONC réduire la masse de la chaussure est d'autant plus important que l'on court vite... avec des grands pieds et des grandes jambes ...

MAIS sans dégrader le confort, les qualités techniques, la durabilité ..

L'amortie



Base : Force action – réaction (3^{ème} loi de newton)

Principe des actions réciproques :

Tout corps A exerçant une force sur un corps B subit une force d'égale intensité, de même direction et de sens opposée, exercée par le corps B.



Propulsive



Réception - Amortie

Nécessité de décomposer la force de réaction en 3 composantes sur chacun des axes

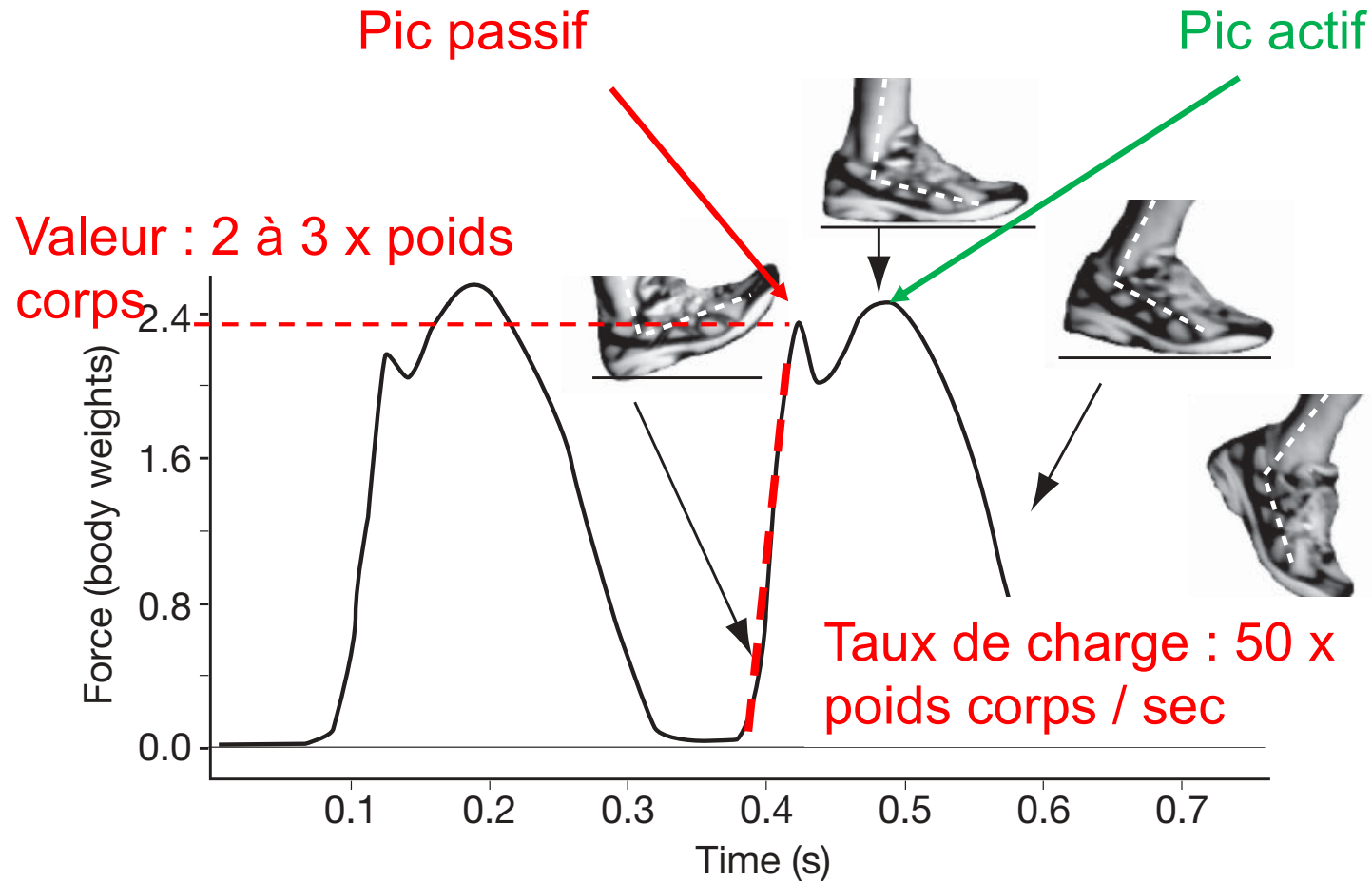


post

c

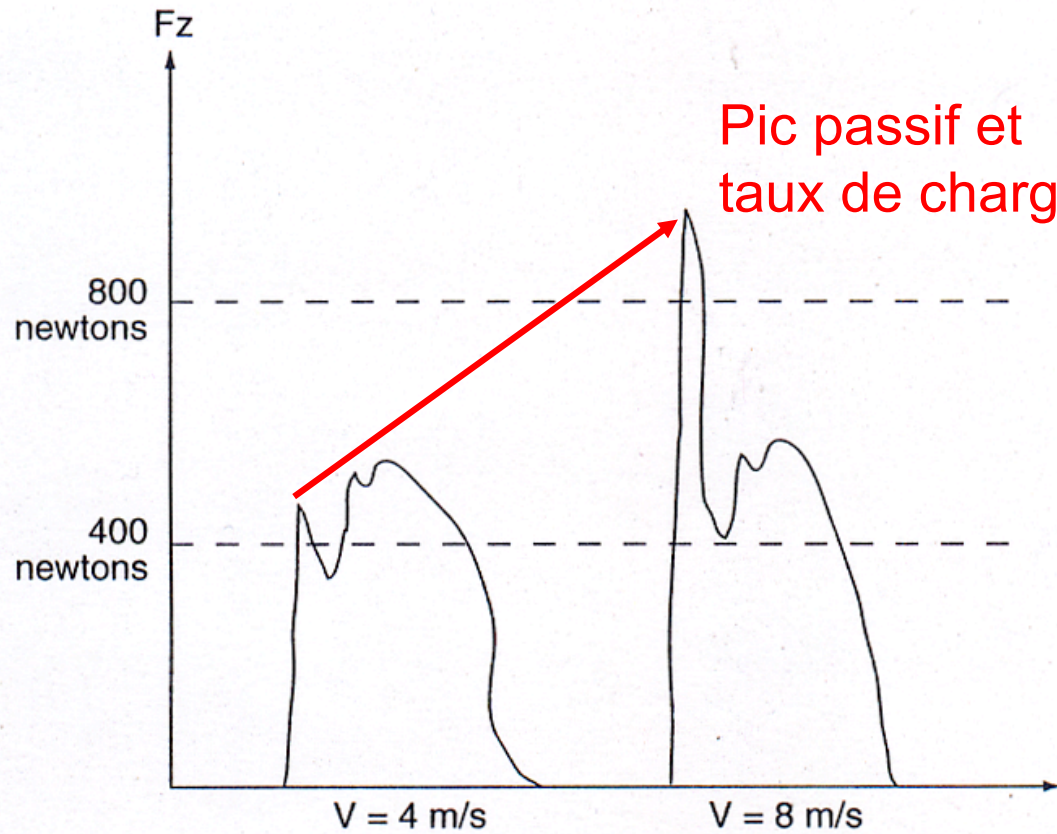
Les 3 ont de l'importance pour la gestion de l'amortie

Composante Verticale de la force de réaction lors de la course

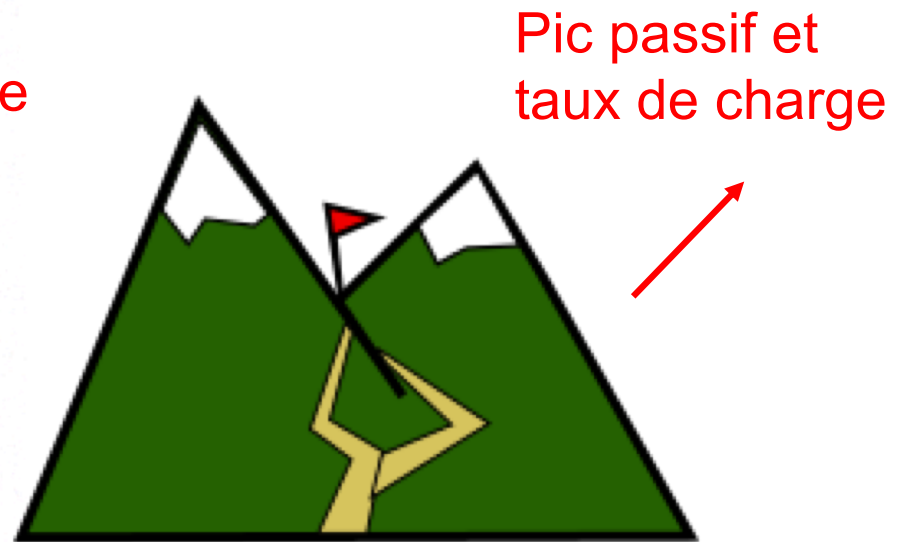


Evolution du pic passif

Avec la vitesse

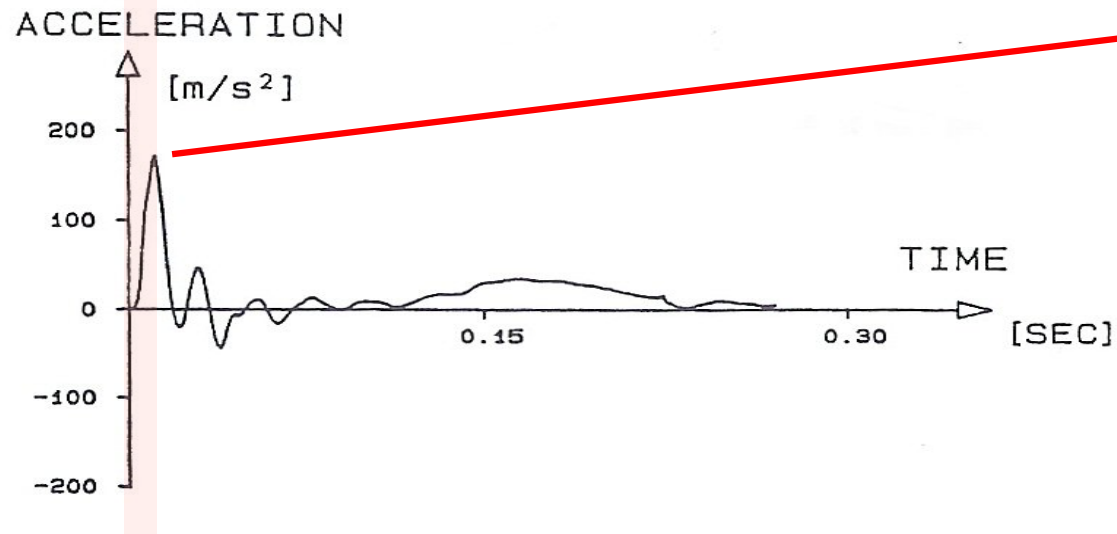
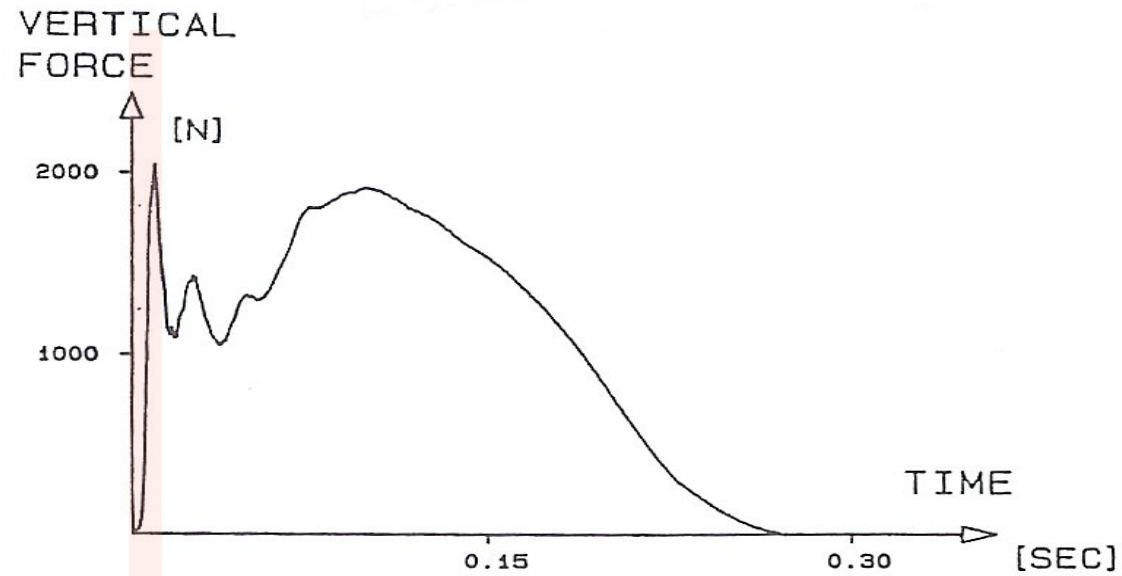


Lors des descentes



Avec la masse : $P = mg$

Décélération à l'impact



Pic de décélération à l'impact 8-15g

Conséquences négatives de ce choc

court et/ou long termes
plus et/ou moins directs

Ostéologie :

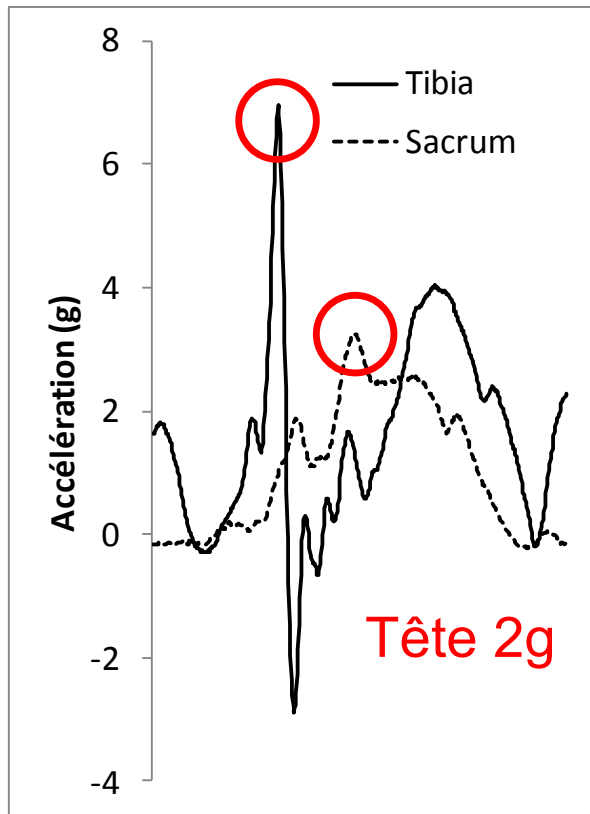
- Fracture de fatigue
- Périostites
- Dégénérescence du cartilage
- Arthrose



Autres :

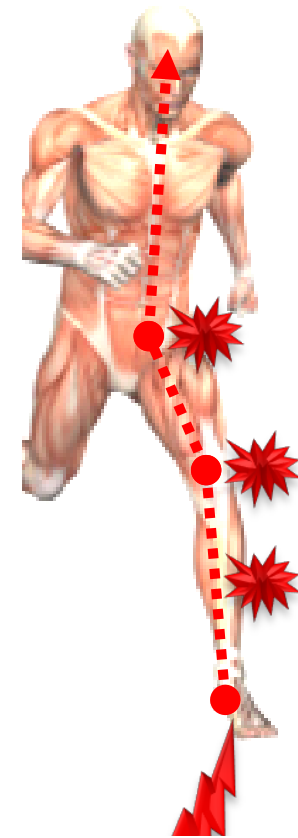
- Tendinites
- Inflammation
- Tassement disques..

Pas de panique, votre corps va réduire cette onde de choc ...



Facteurs d'atténuation de l'onde de choc :

- Flexion du genou
- Os
- Pronation du pied
- Attaque du pied au sol
- Visco-élasticité muscles
- Activation muscles
- disques vertébraux
- **la chaussure ...**



Comment la chaussure va nous aider à amortir ?

Solution 1



Solution 2



SOLUTION 1 : proposer une chaussure amortissante en gardant une attaque du sol talon

- En jouant sur **l'énergie emmagasinée** dans la déformation des matériaux du talon : sur le pic de force et la décélération
- En jouant sur la **durée de la phase de décélération** à l'impact : sur la montée en force et la décélération



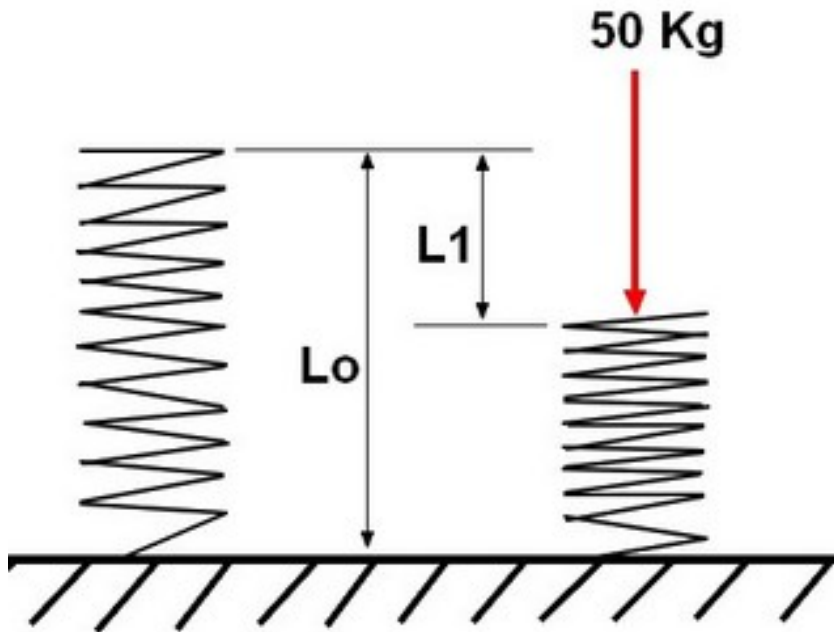
→ Energie emmagasinée dans la déformation d'un matériel (J)

$$EP \text{ stockée} = \frac{1}{2} k \cdot \Delta L^2$$

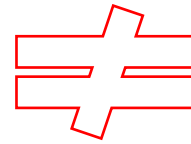
Raideur k : facteur qui affecte le niveau de force nécessaire pour produire un certain niveau de déformation L .

$$K = F/\Delta L$$

avec F en N, ΔL en m, K en $N \cdot m^{-1}$.



Energie stockée dépend de k et ΔL^2



Energie stockée dépend de k et de Δx !!

Trouver des mousses optimales à comportements visco-élastiques, qui durent dans le temps, légères... .. (cellules ouvertes type PU ; cellules fermées type EVA)

Optimiser la hauteur (moyenne 40 mm) et la largeur de la semelle pour augmenter la déformation. Hoka propose 2,5 fois plus d' EVA que les autres, avec une semelle plus large de 35%.



→ Courant maximaliste

Energie stockée dépend de k et de Δx !!

Placer des « ressorts » dans le talon ..



Augmente la masse..
Pas en trail ..

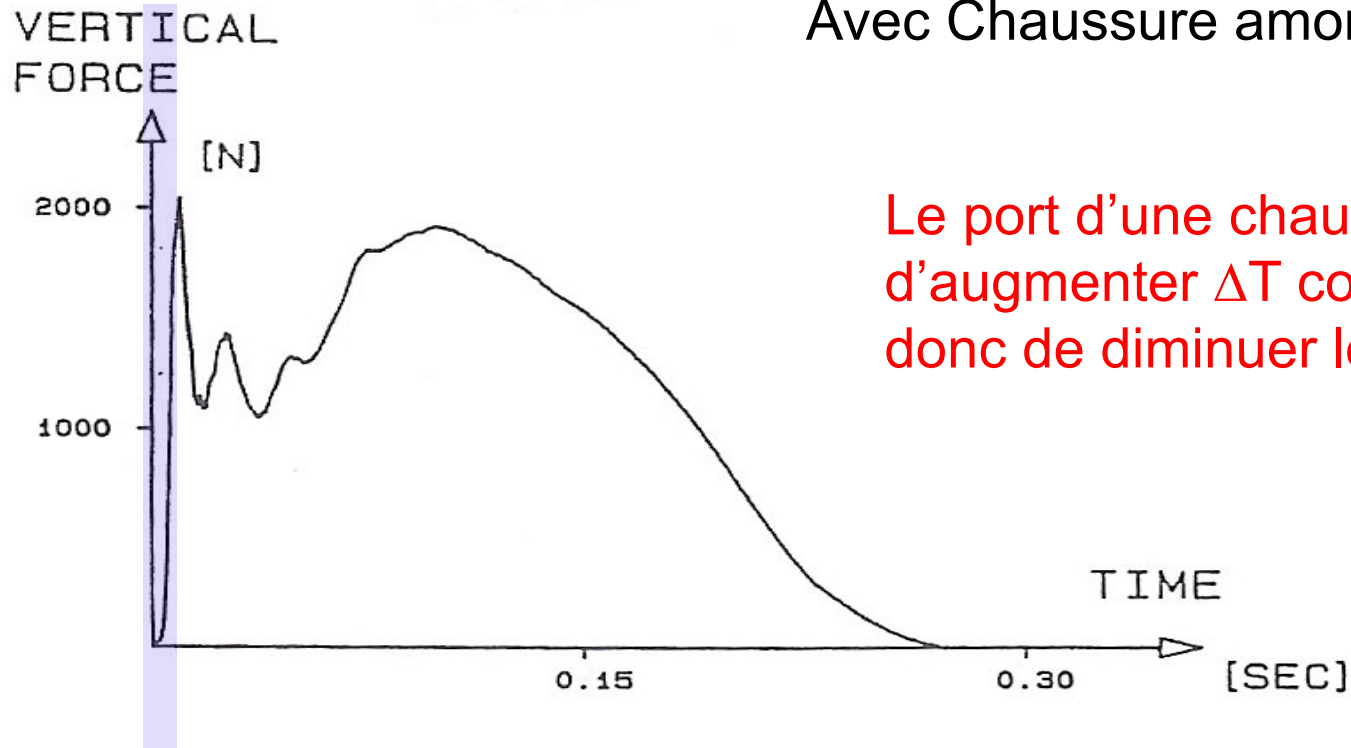


Spira

Allonger la distance et le temps de freinage :

ΔT Temps entre contact initial et pic (ms)

ΔT Sans Chaussure = 10-25 ms
Avec Chaussure amortissante = 15-35 ms



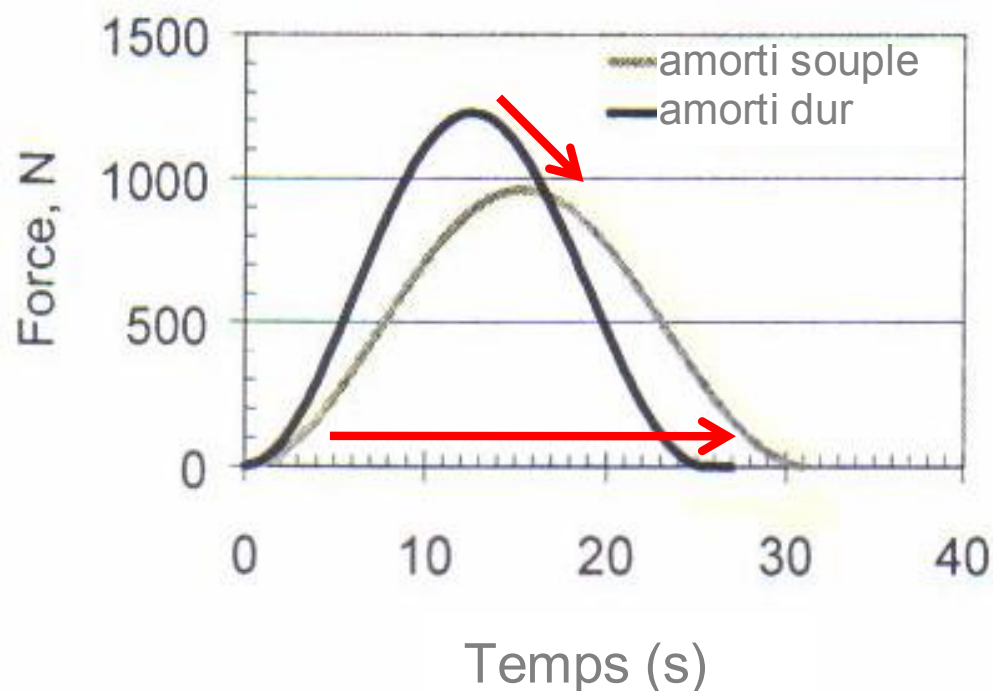
Le port d'une chaussure permet d'augmenter ΔT contact initial-pic, donc de diminuer le taux de charge.

Donc modification de la configuration du choc.

Mais ça marche vraiment ??

Mesure des qualités d'amorti sur les matériaux

Tests d'impact mécanique *in-vitro* sur des matériaux amortissants de chaussures (Shorten 2002)

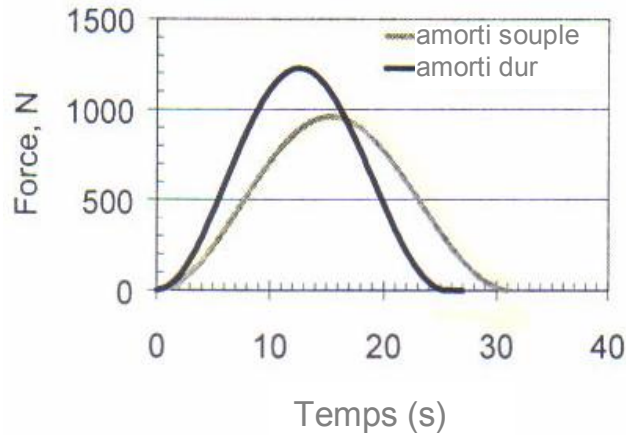


Avec un matériaux souple :

- diminution du pic de force produit par l'impact
- augmentation du temps d'application de la force appliquée
- donc diminution du taux de force moyenne (montée en force)

Effets mesurables significativement

Mais ça marche vraiment ??



Mesure des qualités d'amorti des matériaux sur l'Homme In-Vivo

Hypothèse : diminution du pic passif et du taux de charge lors de l'appui au sol, avec des matériaux amortissants dans la chaussure.

Or **résultats contradictoires**

- Diminution significative (Clarke et al. 1983)
- Pas d'effet ..
- Augmentation significative ... (Nigg et al. 1981)

Pourquoi pas – peu d'effets de l'amorti de la chaussure sur le pic passif et le taux de charge ?

- Réorganisation du corps pour compenser le manque d'amorti de la chaussure : relai d'autres structures !
- Ne pas analyser que l'axe vertical, importance des axes antéro-post et médio-lat.
- S'intéresser à d'autres paramètres avec d'autres outils de mesure.
- Placer le coureur en situation de fatigue pour voir apparaître un effet.

Donc effet de la chaussure amortissante ... sur d'autres paramètres que la force ... et/ou sur la force mais en situation usage fatigue, long terme, si pathologie...

**SOLUTION 2 : se rapprocher de la course pieds nus en modifiant la technique de course :
attaque du sol pointes de pied.**



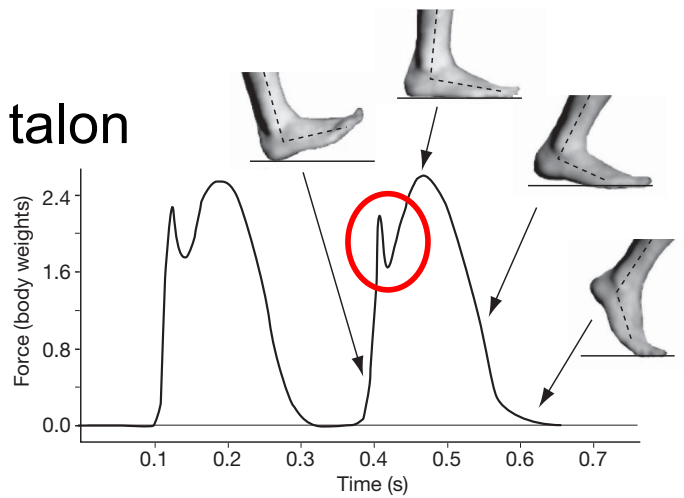
Hasegawa et al. 2007
Larson et al. 2011
Kasmer et al. 2013



Courir très vite :
toujours pointe

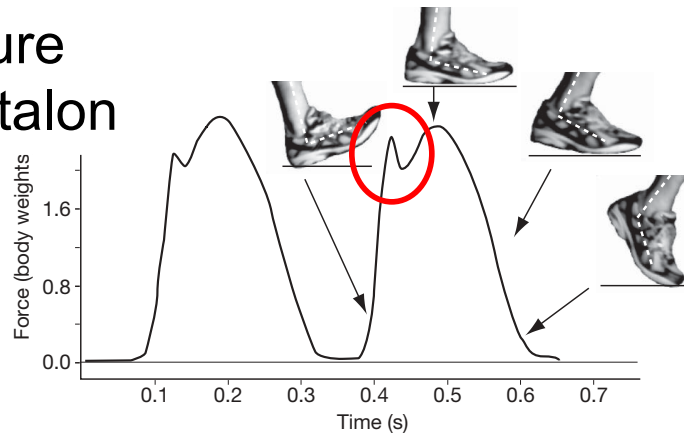
Proposer une chaussure y répondant.

Pied nu
attaque talon

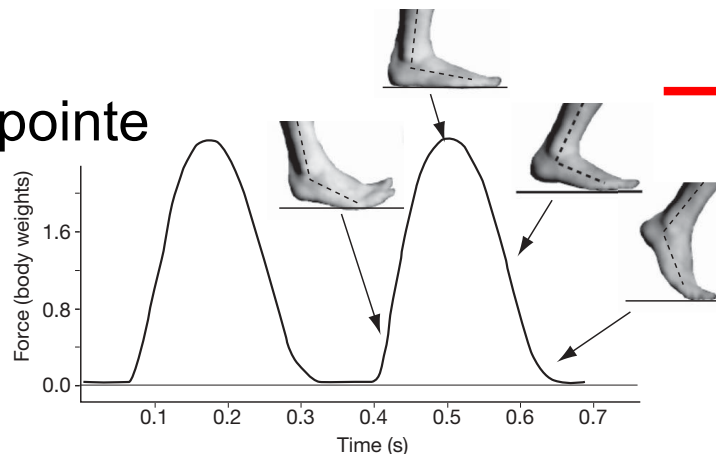


Force verticale et
typologie d'appui

Chaussure
attaque talon

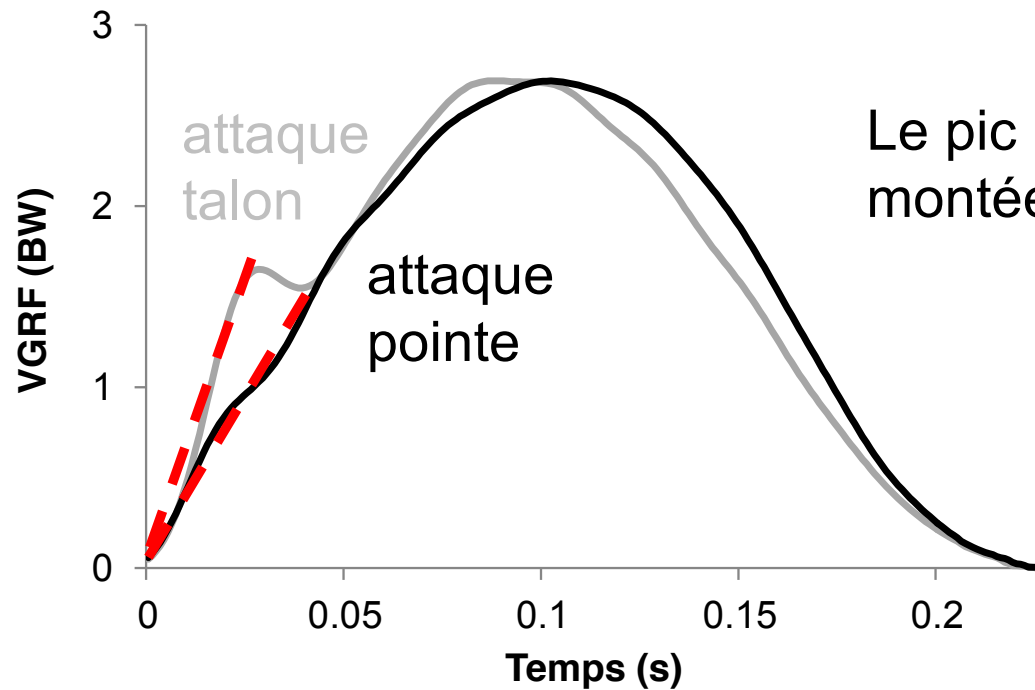


Pied nu
attaque pointe

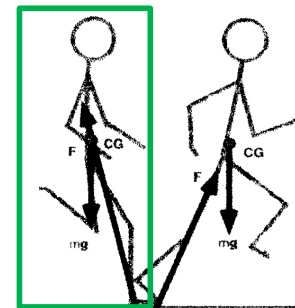
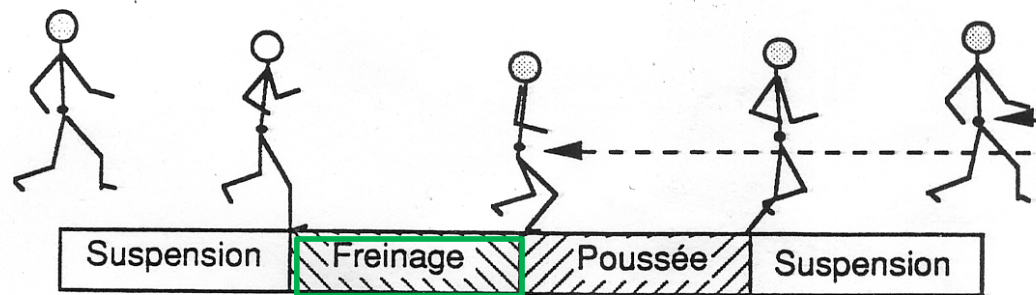


Attaque pointe permet de
réduire – « supprimer » le pic
passif et la montée en charge.

Pourquoi cette modification cinétique attaque pointe ?



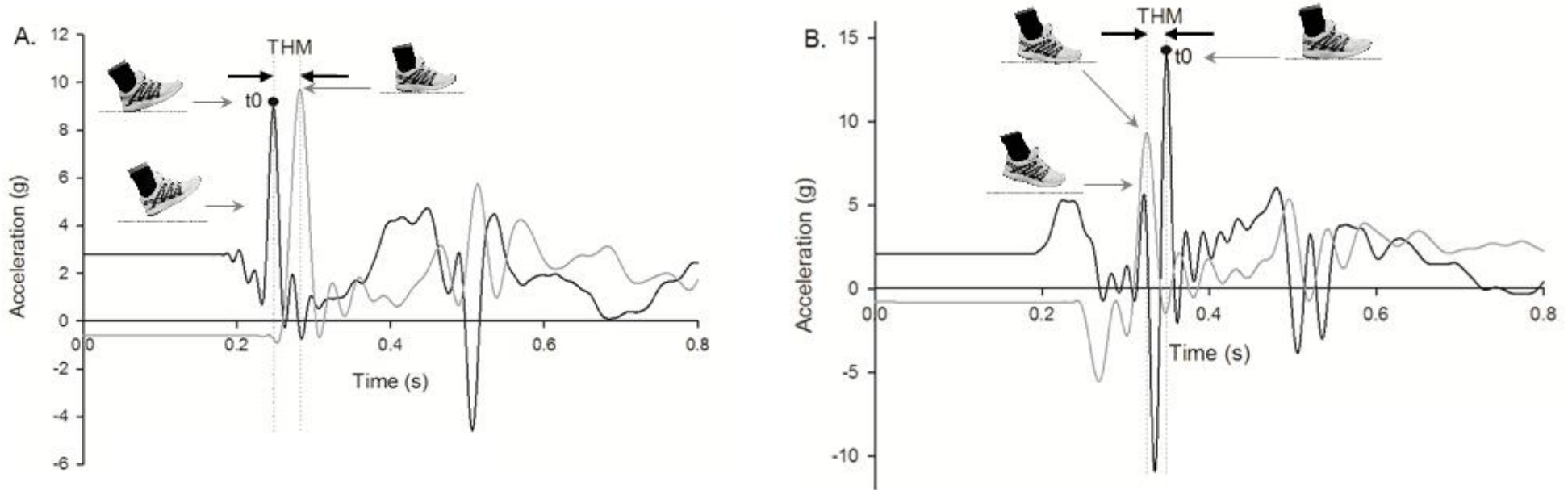
Le pic passif est « caché » dans la montée en force jusqu'au pic actif.



Attaque pointe réduit la phase de freinage, et modifie la cinétique du choc.

Attention, l'onde de choc existe encore !

Accéléromètre talon
Accéléromètre talon



Attaque pointe : pic de décélération à l'impact décalé ..
Mais similaire en intensité.

→ Solution : courir pieds nus (barefoot)

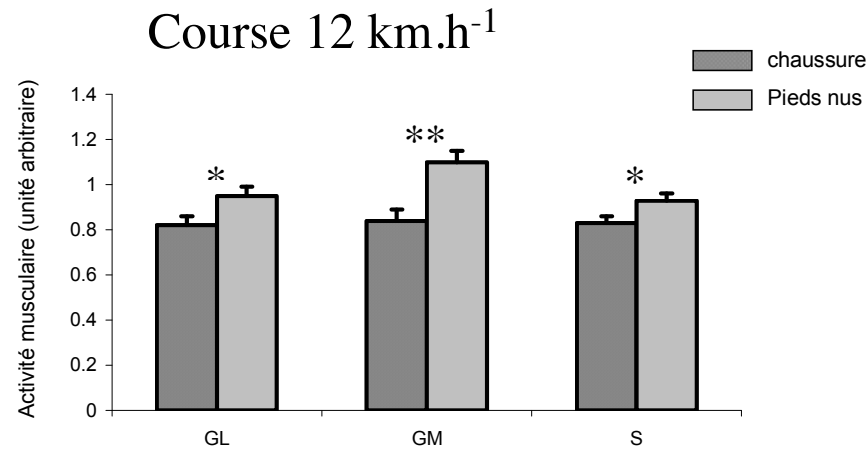


→ Solution : Proposer une chaussure spécifique minimaliste ayant comme fonction juste la protection du pied

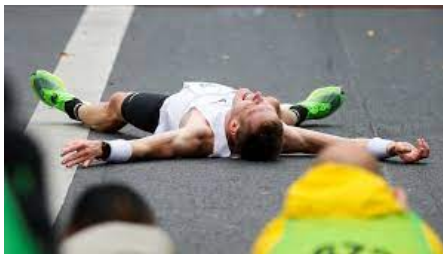


- Pas – peu d’amorti talon (drop)
- Semelle souple (déroulé pied)
- Pas – peu de maintien

Autres conséquences de ces chaussures minimalistes :

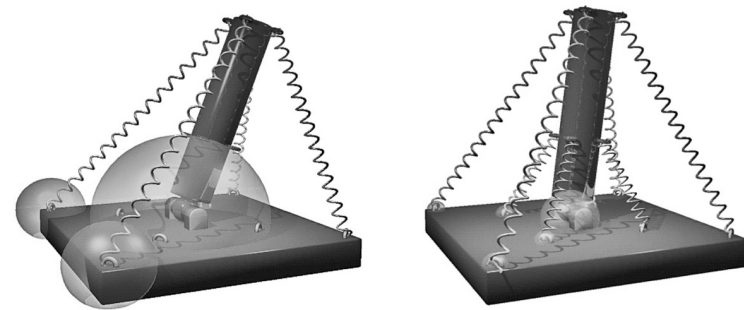


Augmentation significative de l'activité musculaire



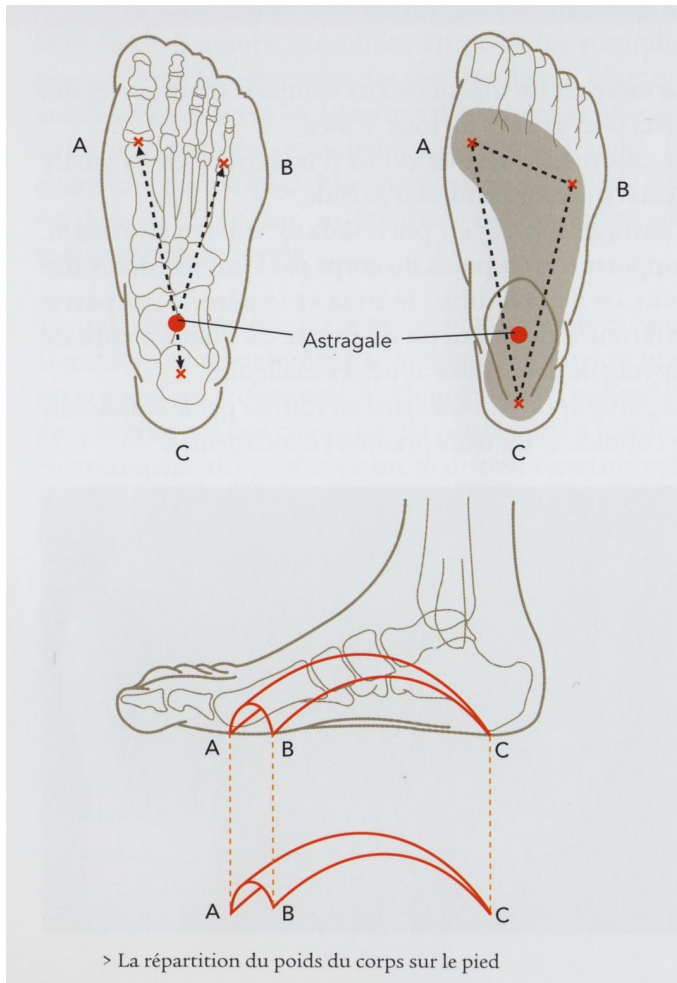
Fatigue neuro-musculaire

Divert zuus

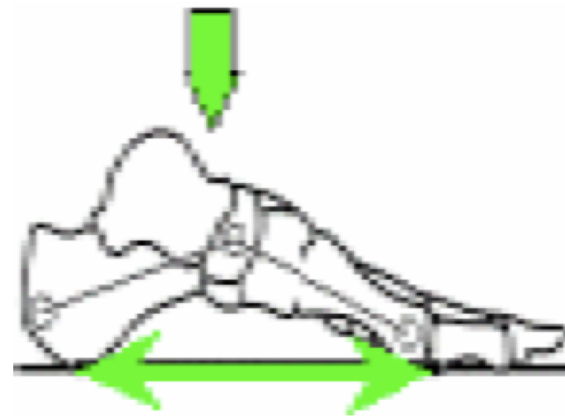


Contrôle de la stabilité

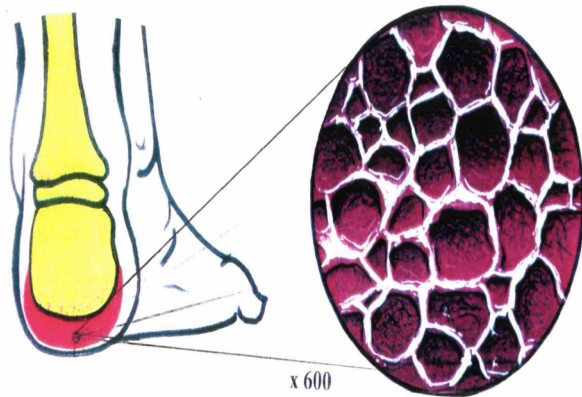
Autre conséquence de ces chaussures minimalistes :



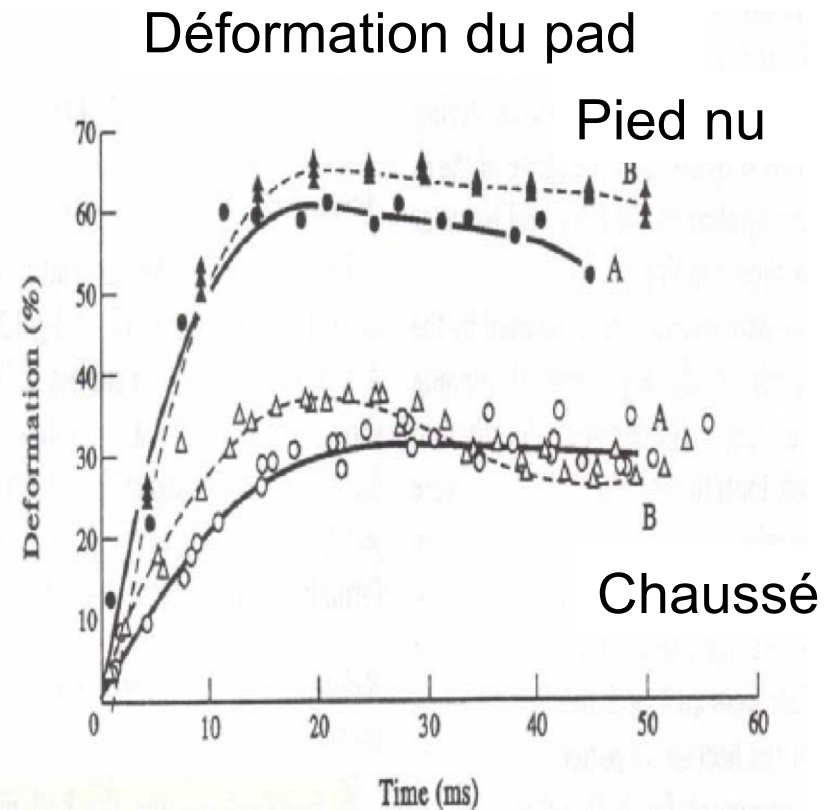
Déformation de la voute plantaire facilitée, donc **énergie emmagasinée dans cette déformation... Donc amorti !**



Autre conséquence de ces chaussures minimalistes :



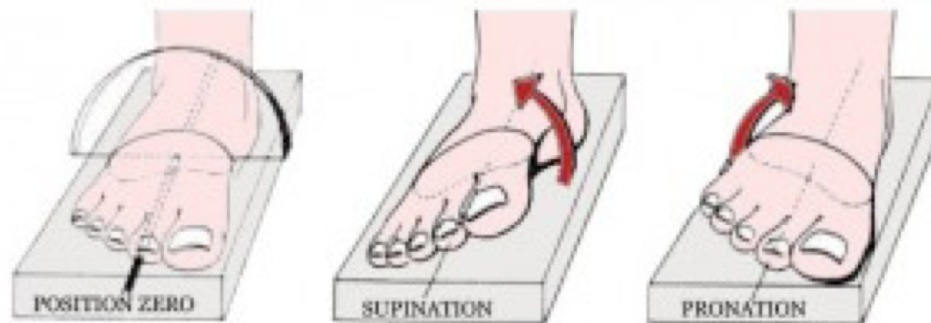
Déformation du sac d'adipocytes attachés sous le talon facilitée, donc énergie emmagasinée dans cette déformation



Autre conséquence de ces chaussures minimalistes :

Eversion : abduction – pronation – flexion d

Inversion : adduction – supination – flexion p



Plus de possibilité de pronation du pied (articulation sub-talaire),
or la pronation permet de réduire l'onde de choc.

Mais aussi des conséquences négatives de ces chaussures minimalistes :

Ostéologie :

- Fracture de fatigue
- Périostites
- Dégénérescence du cartilage
- Arthrose

court et/ou long termes
plus et/ou moins directs

Musculaires et ligamentaires :

- Tendinites
- Inflammation
- Déchirures
- Entorses

Solution 1



Quelle chaussure choisir alors ?

Solution 2



- Idéalement utiliser celle adaptée à votre « situation » présente (technique, poids, niveau, terrain, fatigue, pathologie, ...) et changer !
- Mais s'y habituer.
- Ne pas être buté ... mais curieux et à l'écoute des arguments positifs et négatifs.

Conclusion sur l'apport de la **biomécanique** dans l'optimisation des équipements sportifs.

Replacer le pratiquant au centre de la conception d'un équipement sportif



~~Le pratiquant s'adapte à
équipement sportif~~

~~L'équipement sportif
s'adapte au pratiquant~~

Le pratiquant et
l'équipement sportif sont en
interaction