

## ANALYSE DES CONSÉQUENCES BIOMÉCANIQUES DE LA BRIEVETÉ DU GASTROCNÉMIEN SUR L'AVANT-PIED

C. CAZEAU\*, Y. STIGLITZ, L.S. BAROUK, P. BAROUK

\*Clinique Bachaumont - 75002 Paris - [cyrille.cazeau@netchirurgie.net](mailto:cyrille.cazeau@netchirurgie.net)

### INTRODUCTION

Certains auteurs dont Barouk L.S et ses collaborateurs ont proposé une libération chirurgicale du muscle gastrocnémien au genou, en cas de brièveté, de manière à diminuer les pressions sous l'avant du pied à la marche. Selon eux, cela permettrait de réduire voire de supprimer certains gestes chirurgicaux, à ce niveau. Nous proposons de vérifier cela par une étude biomécanique, en utilisant les résultats cinématiques, dynamiques et électromyographiques caractérisant le déroulement du pas.

### ANATOMIE et PHYSIOLOGIE

#### Anatomie : Fig 1

Le muscle gastrocnémien a deux chefs. Le chef latéral naît de la face latérale du condyle fémoral latéral, le chef médial de la face postérieure du condyle médial. Les deux chefs se réunissent sur la ligne médiane, s'unissent au tendon du muscle soléaire pour constituer le tendon calcanéen.

Le gastrocnémien appartient donc aux muscles muscles bi-articulaires, qui ont la particularité de croiser deux articulations, ici genou et cheville.

#### Physiologie

La représentation admise du muscle sur le plan mécanique et physiologique est le modèle de Hill à trois composantes. Le muscle en contraction est représenté par une composante contractile (ponts d'actine - myosine), une composante élastique série (ponts d'actine - myosine + tendon calcanéen), « raide » ne se laissant pas facilement distendre, et une composante élastique parallèle (trousseaux conjonctifs du muscle), « compliant », se laissant plus facilement distendre.

Les études physiologiques montrent que lorsqu'un muscle déjà étiré est activé, la force qu'il développe est supérieure par stockage d'énergie élastique. Le travail en raccourcissement est plus important, le rendement augmenté. C'est le cas d'un muscle bi-articulaire, nécessairement étiré lors de l'exécution d'un mouvement. Ce type de muscle permet un fonctionnement plus économique du système musculotendineux. C'est le

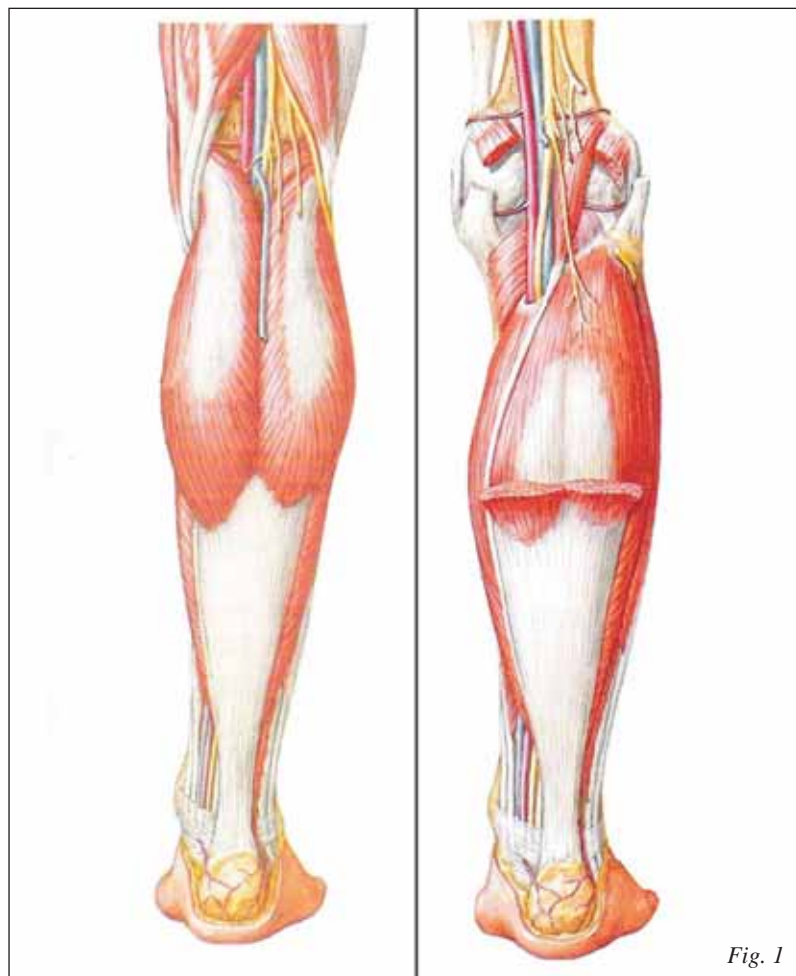
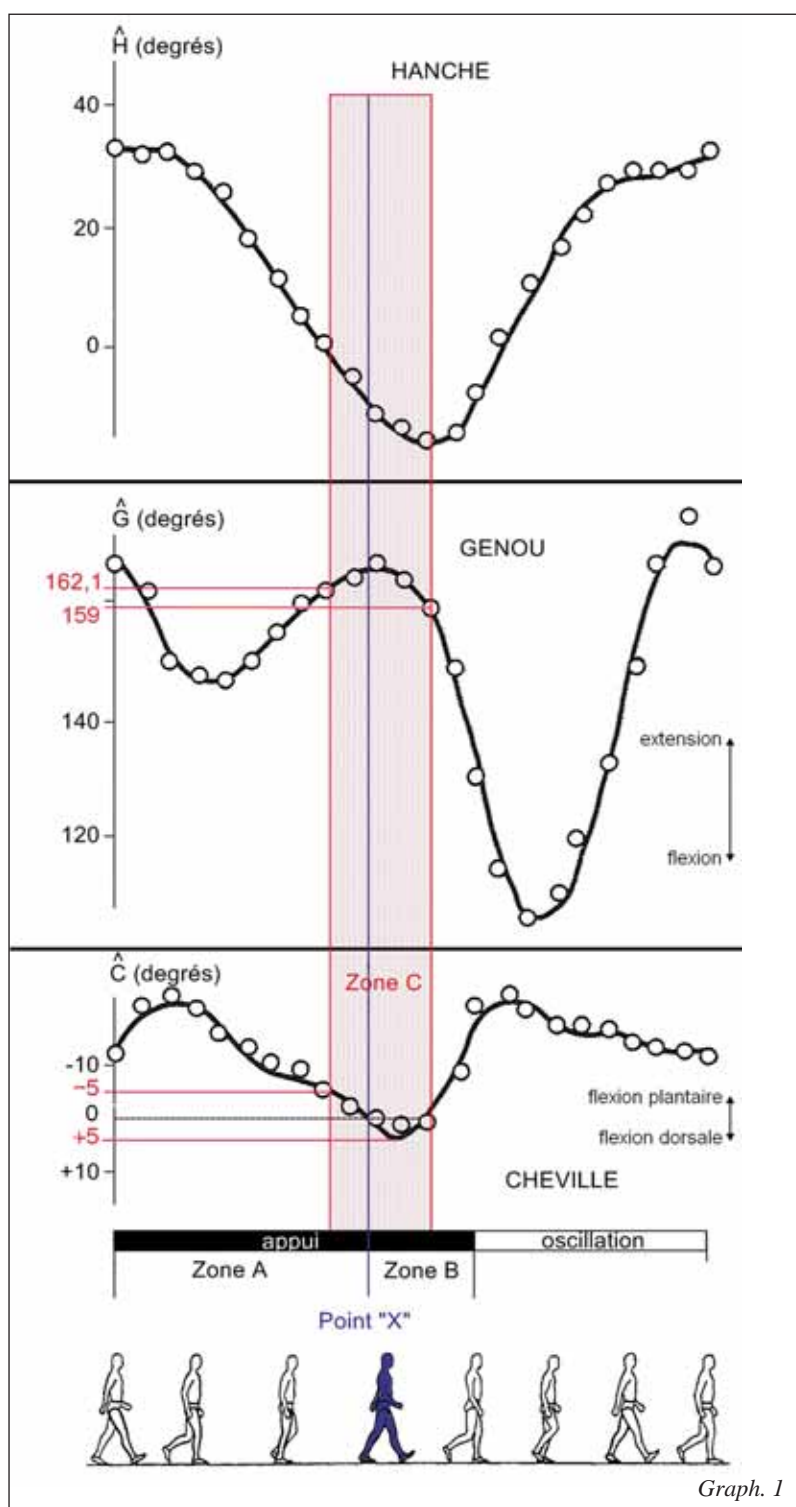


Fig. 1



Graph. 1

principe de « stockage-restitution » d'énergie élastique décrit par Cavagna en 1968, qui s'applique à tout muscle dont la contraction débute alors que ses fibres sont préalablement étirées. Ce pré-étirement correspond à une accumulation d'énergie élastique au sein de la composante élastique série de Hill. Lors de sa contraction, le muscle développe alors une force plus importante pour une dépense énergétique équivalente.

Par ailleurs, le calcul des forces et des moments selon les lois de la mécanique newtonienne montrent qu'un muscle bi-articulaire permet le transfert de l'énergie mécanique d'un chaînon à l'autre, minimisant encore les pertes.

Le gastrocnémien est un muscle bi-articulaire qui mobilise le genou et la cheville.

Au niveau de ce couple articulaire, la mise en flexion plantaire de la cheville sur un genou en extension, puis la mise en flexion dorsale de la cheville avant le passage en flexion du genou représentent des phénomènes de stockage-restitution d'énergie élastique, diminuant les dépenses d'énergie, transfèrent celles-ci d'un segment de membre à l'autre en minimisant les pertes et en augmentant le rendement. Si deux muscles distincts étaient utilisés, le premier effectuerait un travail positif en se raccourcissant, alors que le second serait allongé mais sans se raccourcir ensuite, dissipant ainsi l'énergie stockée sous forme de chaleur.

Les muscles bi-articulaires permettent donc une économie d'énergie et son transfert d'un chaînon à l'autre, constituant deux avantages majeurs.

### ANALYSE CINÉMATIQUE DE LA MARCHÉ

#### Introduction

La cinématique est l'étude de l'effet des forces, comme le

déplacement, la vitesse, et l'accélération.

Dans cette étude nous intéressons à la phase de la marche dans laquelle la brièveté du gastrocnémien pourrait se dévoiler.

C'est la raison pour laquelle nous ne décrivons que la phase d'appui. En effet la phase d'oscillation (swing phase) est caractérisée par la flexion conjuguée du genou et de la cheville (en plantaire), situation de détente maximale du gastrocnémien, qui ne démasque pas cette pathologie.

#### Description de la phase d'appui (stance phase)

Le pied rentre en contact avec le sol par le talon, (heel strike ou heel contact ou foot strike), suivi du bord externe du pied et la tête des cinq métatarsiens puis les orteils ; c'est le déroulement du pas du talon à la pointe. Puis le talon quitte le sol, le pied restant ferme, les articulations métatarso-phalangiennes en hyperextension. La phase d'appui prend fin lorsque le pied quitte le sol (toe off ou foot off). Le tout dernier contact se fait par le gros orteil. Le graphique 1 permet d'analyser l'évolution angulaire de la hanche, du genou et de la cheville lors du déroulement de la marche. Dans la figure 2 nous avons modélisé le membre inférieur sous formes de chaînons en respectant les valeurs angulaires du graphique 1, à quatre instants précis : début d'appui, déroulement du pas au moment où la cheville est à 0° (point X) puis en flexion dorsale maximale, et lever du pas.

Ces quatre instants sont reportés dans le tableau 1.

#### Que se passe-t'il de part et d'autre du point X ? (fig 2)

Du début de l'appui au point X (fig 2, zone A), la hanche passe de la flexion (+30°) à l'extension (-10°). Le genou reste en extension (de 15° à 10° de flexion), la cheville passe de la flexion plantaire (-20°) à la position neutre représentée par le point X (0°).

Tableau 1 : valeurs angulaires des hanche, genou et cheville à quatre instants de l'appui.

	Début d'appui	Déroulement du pas A partir du point X	Lever du pas
HANCHE	+30° FLEXION	-10° EXTENSION	-10° EXTENSION
GENOU	+15° EXTENSION	+10° à < +10° EXTENSION	+40° FLEXION
CHEVILLE	-20° FLEXION PLANTAIRE	0° à > +5° NEUTRE à FLEXION DORSALE	-20° FLEXION PLANTAIRE

Du point X au lever du pas (fig 2, zone B), la hanche reste en extension ( $-10^\circ$  à  $-20^\circ$  puis  $-10^\circ$ ), le genou passe de l'extension ( $10^\circ$ ) régulièrement à  $40^\circ$  de flexion. La cheville passe de  $0^\circ$  à  $5^\circ$  de flexion dorsale puis à  $20^\circ$  de flexion plantaire ( $-20^\circ$ ).

On constate que la phase la plus intéressante (fig 2) se situe peu avant et peu après l'instant où la cheville est à angle droit. Cet instant est identifié par le point X, on a alors parcouru 70,6 % de l'appui. En effet dans cette zone que nous nommons zone C, (Graph 1), l'effet conjugué de l'extension du genou et de la flexion dorsale (ou de l'extension plantaire faible) de la cheville mettent en tension le gastrocnémien, en raison de son caractère bi-articulaire.

Cette zone C est critique : la cheville oscille de  $4$  à  $5^\circ$  de part et d'autre de la position neutre, pour un genou qui reste en extension (entre  $15$  et  $20^\circ$  de flexion).

Elle débute au 60<sup>ème</sup> percentile de la phase d'appui et se termine au 88<sup>ème</sup> percentile de son déroulement.

## ANALYSE DYNAMIQUE DE LA MARCHÉ : étude des réactions au sol

### Matériel utilisé

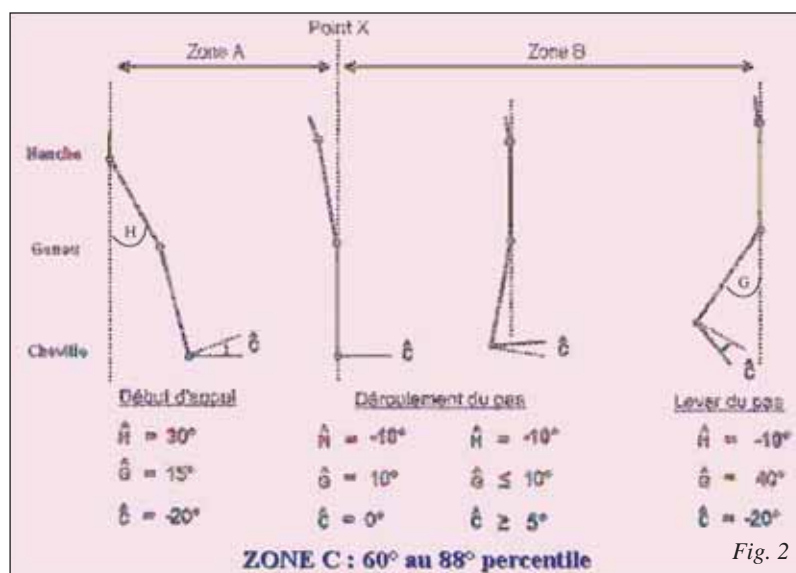
La dynamique est l'étude des forces qui agissent sur un système matériel. Les principes mécaniques utilisés sont les lois de Newton.

Le système utilisé est celui d'une plate-forme de force, qui permet d'enregistrer par l'intermédiaire de transducteurs, les forces externes transmises par le corps humain au plateau de la plate-forme. Ces forces sont constituées par le poids et les actions de contact entre sol et surface plantaire.

### Paramètres mesurés

- On mesure ainsi la résultante vectorielle  $\vec{R}$  des forces de réaction du sol, elle exprime la conséquence globale de l'action des muscles. On la décompose en une force sagittale antéro-postérieure représentant la propulsion, une force verticale responsable de l'élévation du centre de gravité, et une force latérale dans le plan frontal. Connaissant masse et poids du sujet, on peut calculer accélération vitesse et déplacement du centre de gravité.

- On peut calculer aussi et cela nous intéresse ici plus directement le centre des pressions I, qui est le point d'application de la résultante des forces de réaction verticales. Il permet de déterminer l'endroit où le pied prend contact puis quitte le sol, et ainsi de connaître la trajec-



re entre ces points. On peut avoir également accès à la distribution des pressions sous le pied à la marche.

L'analyse dynamique (graphique 2) permet donc d'étudier la répartition des centres de pressions lors du déroulement de la marche.

### Les résultats dans la zone C

- Comportement du centre de gravité :

La composante sagittale présente un pic élevé, après que la

hanche passe à la verticale de la cheville, signant l'action de propulsion, la poussée précédant le lever du pied. En ce qui concerne la composante verticale, dans la même zone chronologique, on observe une élévation puis une chute du centre de gravité, rattrapage après la phase de perte de l'équilibre, liée à la poussée qui précède le lever du pied.

Au total, la phase C, correspondant anatomiquement à l'avant du pied, est caractérisée sur le plan dynamique par une élévation puis une chute du centre de

Rachis    Traumatologie    BioMatériaux    Ciments    **Arthroplastie**

# ALPINA<sup>®</sup> APR

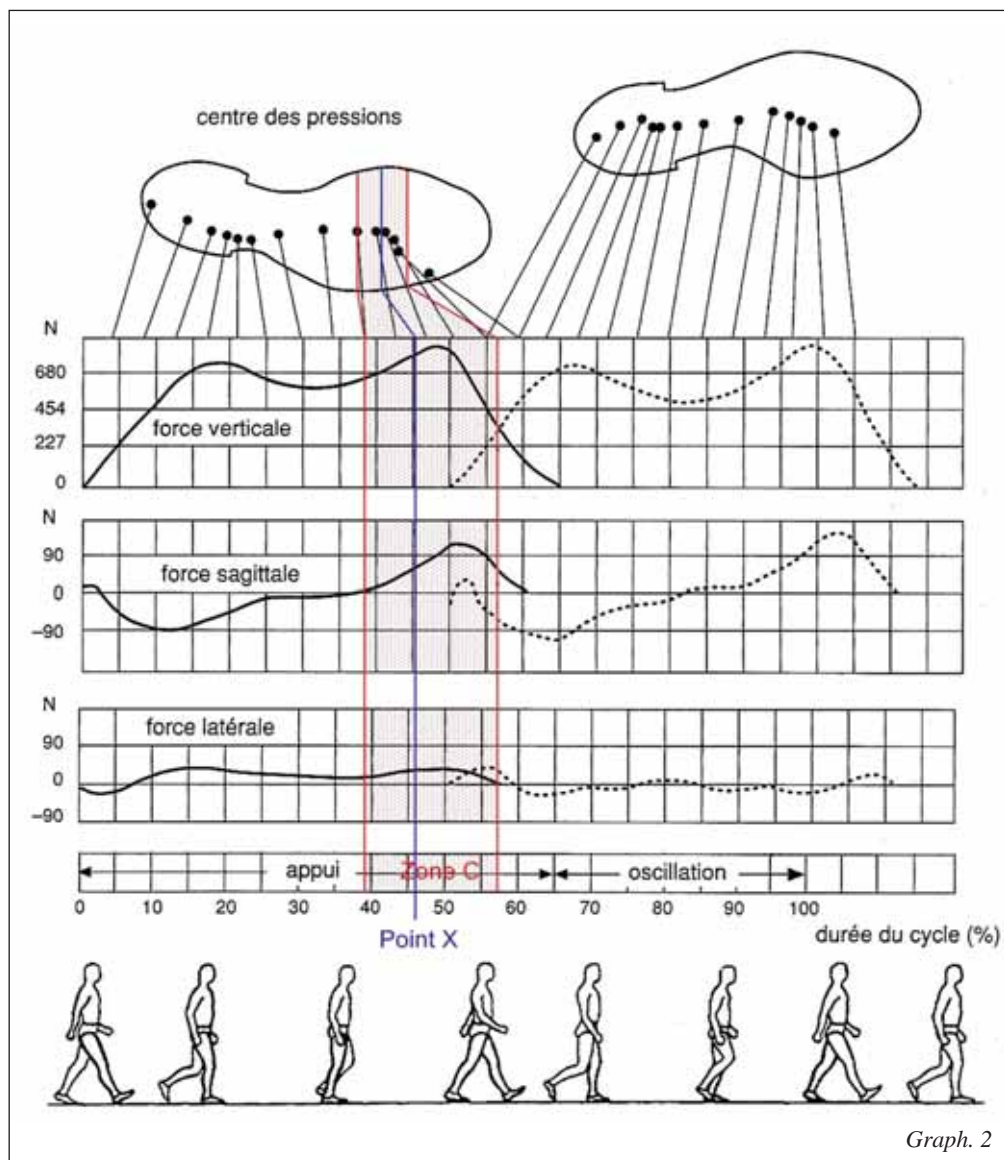
## L'Alpina rotatoire

Le tenseur ligamentaire **ITITUDE** instrumentation

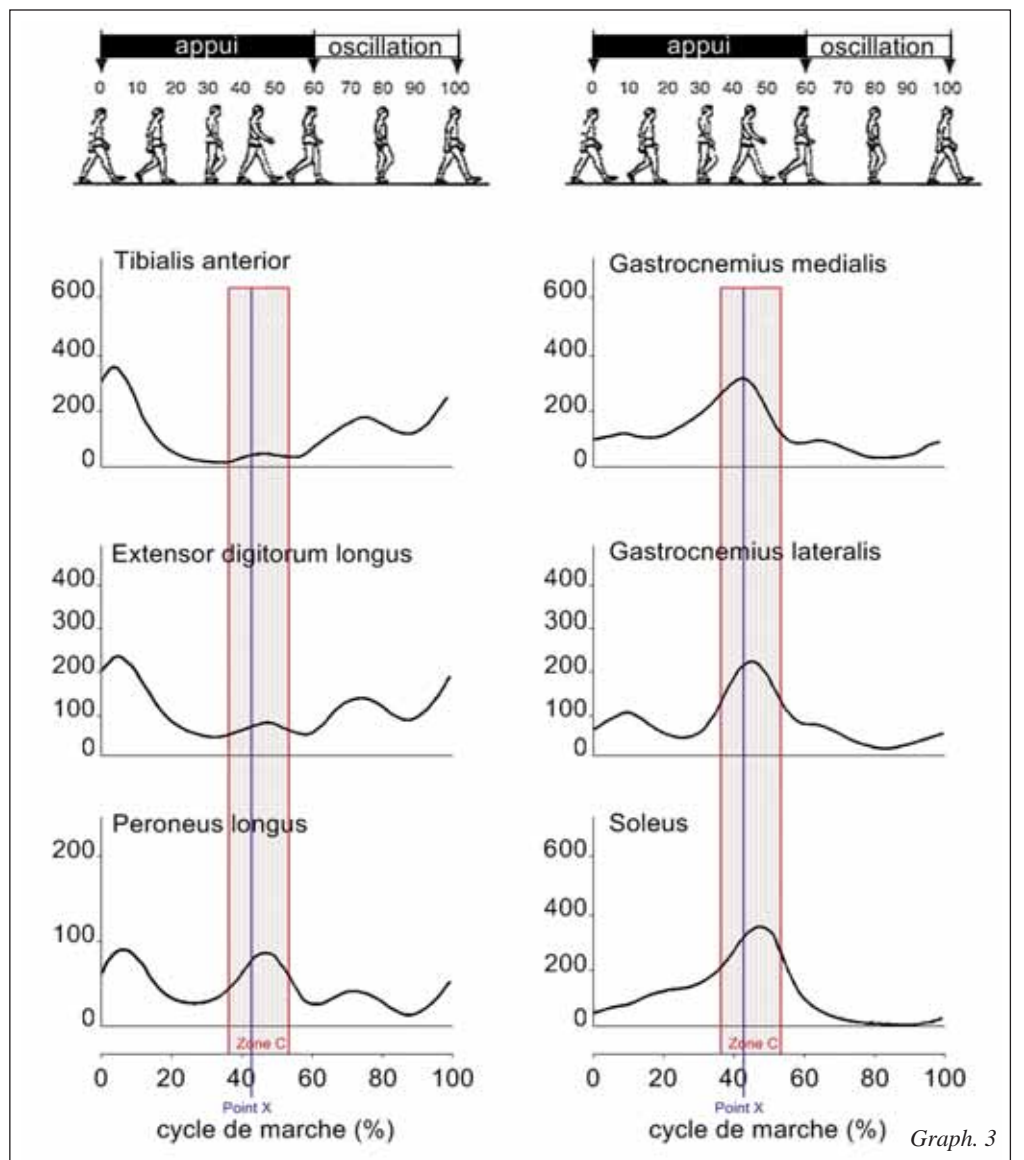
Un équilibre parfait.

BIOMET France  
Plateau de Lautagne  
B.P. 75 - 26903 Valence Cedex 9 - FRANCE  
Tel : 33 (0)4 75 75 91 00 - Fax : 33 (0)4 75 75 91 01  
www.biomet.fr

**BIOMET**  
Europe



Graph. 2



Graph. 3

gravité, suivie de propulsion. Cela reflète la conversion d'énergie potentielle du système en énergie synétique.

- Répartition des centres de pression :

Quand on reporte (graphique 2) chronologiquement la phase C sur le tracé représentant le déplacement du centre des pressions, on constate que celles-ci concernent l'avant-pied, au niveau des têtes métatarsiennes. On est alors en mesure de penser que l'augmentation de la flexion dorsale pourrait diminuer les pressions à ce niveau.

## ANALYSE ELECTROMYOGRAPHIQUE

On enregistre l'activité électromyographique (EMG) des muscles gastrocnémien, soléaire, et des antagonistes par des électrodes de surface. Les valeurs, moyennes, sont exprimées en microvolt (graphique 3).

L'analyse des courbes EMG montre que l'activité se fait par bouffées. Le 1<sup>o</sup> pic apparaît lors du transfert du poids au sol au début de l'appui, le 2<sup>o</sup> pic nous intéresse plus car il survient pendant la phase C, période d'accélération du membre.

Le pic puis la chute d'activité de la deuxième bouffée EMG du gastrocnémien (courbe en vert) s'intègre pendant la phase C dans le fonctionnement du muscle bi-articulaire, montrant ainsi son efficacité,

lors de deux séquences successives. (graphique 4)

- La première survient avant et au début de la phase C jusqu'au point X ; le muscle gastrocnémien est en étirement maximum par la mise en extension du genou, la cheville autour de 0°.

- C'est alors, sur cette tension maximale, que survient le pic EMG : l'énergie mécanique est alors au plus haut, selon les propriétés du muscle bi-articulaire. Cela se remarque en comparant la courbe cinématique du genou et de la cheville avec la courbe EMG du gastrocnémien.

- La deuxième séquence survient après le point X, à la fin de la phase C ; la chute d'activité électromyographique du gastrocnémien et du soléaire après le point X facilite la mise en flexion dorsale de la cheville, à condition qu'elle soit possible, soulignant l'intérêt d'une chirurgie de libération.

La mise en flexion dorsale de la cheville à ce moment de la marche n'est d'ailleurs pas liée à l'activation des muscles antagonistes comme le montre la faible activité électrique du Tibialis anterior (courbe en bleu) et de l'Extensor digitorum longus sur le graphique 3. C'est la chute en avant du corps, qui provoque de façon passive cette flexion dorsale, comme en atteste la diminution de la force verticale suivie du pic de force sagittale, observés à cet instant sur le graphique 2.

- Par la suite, après la zone C, en début de phase d'oscillation, la tension maximale du gastrocnémien se traduit par

la flexion automatique du genou, et la flexion plantaire de la cheville.

- Tout cela illustre bien l'intrication des activités musculaires électriques avec le fonctionnement d'un système bi-articulaire, lors de l'exécution de mouvements coordonnés, ici la marche.

- On remarque l'économie du système ; les antagonistes sont silencieux lors de la flexion dorsale de la cheville qui est obtenue sans dépense, par transformation de l'énergie potentielle du système en énergie cinétique, l'abaissement du centre de gravité se transformant en effet en propulsion. De même, l'économie du système est présente dans

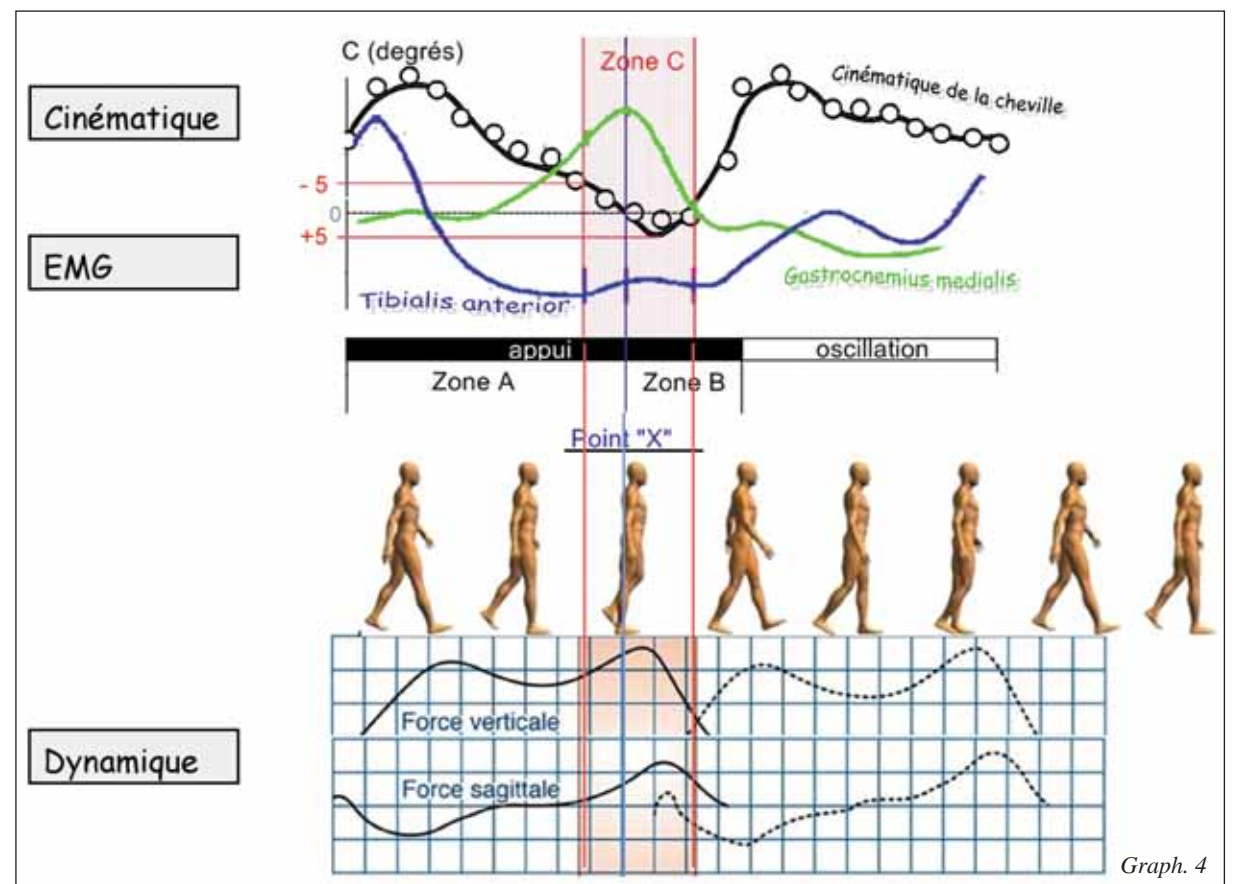
la mesure où l'activité du gastrocnémien est paradoxalement au plus bas chaque fois que la cheville est en flexion plantaire (début d'appui et phase d'oscillation).

Le moment de la phase C où intervient la bouffée d'activité EMG du gastrocnémien est particulièrement intéressant : elle survient juste après la mise en tension du muscle par l'extension du genou augmentant ainsi l'efficacité de la flexion plantaire de la cheville, et cesse suffisamment tôt pour autoriser la mise en flexion dorsale de la cheville, aidant alors la flexion du genou.

Cette bouffée d'activité, correspond à l'élévation du centre de gravité avec propul-

sion, le muscle étant en situation d'étirement. Les processus de stockage restitution d'énergie élastique décrits au début de l'article montrent alors que le stockage d'énergie élastique est plus important ainsi que le travail en raccourcissement, et que le rendement va être amélioré. Il faut cependant que la phase d'étirement et de contraction s'enchaînent rapidement, pour ne pas que l'énergie élastique soit dépensée en chaleur.

On est en mesure de penser que l'amélioration de la flexion dorsale de la cheville par libération du gastrocnémien pourrait non seulement diminuer les pressions au niveau de l'avant-pied comme



Graph. 4

cela est montré dans l'étude dynamique, mais également améliorer l'efficacité de la marche en terme de rendement et économie d'énergie.

## CONCLUSION

L'analyse cinématique permet d'identifier avec précision la phase lors de l'appui qui pose un problème potentiel en cas de brièveté du gastrocnémien. Cette phase caractérisée par la position du genou en extension et la cheville autour de 0°, débute approximativement au 60<sup>ème</sup> percentile pour se terminer au 90<sup>ème</sup> percentile de la phase d'appui.

Les résultats dynamiques montrent que la phase identifiée correspond bien au déplacement du centre des pressions au niveau de l'avant-pied. Cela confirme l'idée avancée par Barouk L.S. et ses collaborateurs, selon laquelle la libération chirurgicale du gastrocnémien pourrait diminuer les pressions sous l'avant du pied, et par là même minimiser ou supprimer certains gestes chirurgicaux à ce niveau. Les résultats dynamiques montrent par ailleurs que la phase identifiée correspond à une élévation puis une chute du centre de gravité, suivie de propulsion.

Les résultats électromyographiques permettent l'analyse suivante ; la libération du gastrocnémien en facilitant la flexion dorsale de la cheville devrait améliorer l'efficacité du gastrocnémien et du soleaire selon le principe du stockage-restitution de l'énergie élastique. Survenant au moment de la chute puis de la propulsion du centre de gravité, la libération chirurgicale du gastrocnémien semble également utile dans l'amélioration de cette flexion dorsale.

Il reste alors à valider la pertinence dans le choix topographique de cette libération : selon le modèle décrit par Hill, il semble plus cohérent de translater l'ensemble du modèle élastique vers le bas par désinsertion du gastrocnémien au genou plutôt que de créer chirurgicalement une cicatrice fibreuse au sein du corps musculaire lui-même ou dans le tendon calcanéen, altérant ainsi leurs propriétés élastiques, même si cela diminue en théorie un peu l'action du muscle bi-articulaire. Cela restera bien entendu à valider par les études cliniques.

## BIBLIOGRAPHIE

- ARMAND S., MERCIER M., WATELAIN E. *Aspects biomécaniques et apport de l'analyse quantifiée de la marche dans les rétractions du triceps sural. La rétraction du triceps sural.* Sauramps médical, Montpellier, 2005, pp 56-61
- BAROUK L.S., BAROUK P. *Reconstruction de l'avant-pied.* Springer-Verlag. France, Paris, 2005, pp. 158-67
- BAROUK L.S., BAROUK P., TOULLEC E. *Brièveté des muscles gastrocnémiens et pathologie de l'avant-pied. La libération proximale chirurgicale.* Med Chir Pied, Springer 2005, 21 :143-152
- BERILLON, G. *Le pied des hominoides miocènes et des hominidés fossiles.* Cahiers de paléanthropologie, CNRS éditions, Paris, 2000
- BOUISSET, S. *Biomécanique et physiologie du mouvement.* Masson, Paris, 2002
- CAVAGNA G.A. *Positive work done by a previously stretched muscle.* J. Appl. Physiol. 1968, 24,21-32
- CORNU J.Y., DUSSAUCY A., JEUNET L. *Baropodométrie sur Plateforme (BPF) et tendon calcanéen. La rétraction du triceps sural.* Sauramps médical, Montpellier, 2005, pp 48-55
- DI GIOVANNI M.D., CHRISTOPHER W., RODERICK KUO, ET AL. *Isolated Gastrocnemius tightness.* J Bone Joint Surg (Am), 2002, 84 :962-70.
- KOWALSKI C. *La rétraction du triceps sural et ses conséquences biomécaniques et pathologiques. La rétraction du triceps sural.* Sauramps médical, Montpellier, 2005, pp 33-47
- HILL, A.V. *The heat of shortening and the dynamic constants of muscle.* Proc. Roy. Soc. B. ,1938, 126, 136-195
- HANSEN J. T. *Netter's AnatomyFlash cards.* Masson, Paris, 2004
- RODINEAU J. *Examen clinique du système propulsif achilleo-calcaneo-plantaire et morphotype de sujets à risque. La rétraction du triceps sural.* Sauramps médical, Montpellier, 2005, pp 142-8



## Salto

Mobile dans le temps, naturellement.

98 % de taux de survie de 3 à 5 ans.\*  
Une instrumentation complète et précise.



\*Clinical Orthopaedics and Related Research, N°424, pp 15-18, Midterm Results of the Salto Total Ankle Prosthesis.

**TORNIER**   
IMPLANTS CHIRURGICAUX

161, rue Lavoisier, Montbonnot 38334 Saint-Ismier cedex. Tél. 33 (0)4 76 61 35 00. Fax 33 (0)4 76 61 35 59. E-mail : marketing@tornier.fr. www.tornier.com