

## ANALYSE BIOMÉCANIQUE D'UNE SPÉCIFICITÉ DE LA BIPÉDIE HUMAINE : la mise en flexion dorsale de la cheville lors de l'appui

Cyrille CAZEAU

Clinique Bachaumont, 75002 paris, [cyrille.cazeau@netchirurgie.net](mailto:cyrille.cazeau@netchirurgie.net)

### INTRODUCTION

La bipédie est une entité anatomo-fonctionnelle, qui regroupe des mécanismes biomécaniques très variés.

Source d'enjeux majeurs, ce concept a été survalorisé au cours des siècles, par ignorance, croyance en une création divine, ou pour alimenter les diverses théories de l'évolution, avec un indissociable sentiment anthropocentrique de supériorité. Elle est toujours aujourd'hui considérée comme une des clés du processus d'homínisation. Cela nous peut-être conduit à unir de force dans une relation phylogénique directe et verticale singes et hommes, et à y placer automatiquement les australopithèques comme forme intermédiaire.

L'espèce humaine se déplace pourtant selon un mode de bipédie très spécialisée, unique, très différente même de celle adoptée par les animaux réputés phylogénétiquement pour être les plus proches, c'est à dire les grands singes dont le Bonobo fait partie.

Une phase très courte de l'appui, survenant entre le 60° et le 88° percentile de celui-ci, est particulièrement intéressante, car elle concerne la brève mise en flexion dorsale de la cheville. Celle-ci permet au muscle gastrocnémien de remplir sa fonction de muscle bi-articulaire, conférant un avantage majeur en terme d'économie énergétique, et définissant le modèle mécanique humain en pendule inversé.

Nous allons dans cet article décrire brièvement la cinématique et la dynamique de l'appui chez l'homme, nous intéresser aux facteurs biomécaniques qui autorisent la flexion dorsale de la cheville, décrire les conséquences de celle-ci juste avant le lever du pas. Nous pourrions alors mettre en exergue l'action du gastrocnémus et des releveurs de la cheville.

Nous analyserons alors les caractéristiques biomécaniques du Bonobo, en soulignant les différences majeures de fonctionnement.

### L'HOMME : UNE BIPÉDIE TRÈS SPÉCIALISÉE

#### Anatomie et physiologie

##### Anatomie

Le muscle gastrocnémien a deux chefs qui naissent des

condyles fémoraux, et 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. Lors de sa contraction, le muscle développe alors une force plus importante pour une dépense énergétique équivalente et permet un fonctionnement plus économique du système musculo-tendineux. 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 principe de « stockage-restitution » d'énergie élastique décrit par Cavagna en 1968.

Par ailleurs, le calcul des forces et des moments 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. IL diminue les dépenses d'énergie, transfère celles-ci de la cuisse au pied en minimisant les pertes et en augmentant le rendement. Si deux muscles distincts étaient utilisés, le premier effectuerait un travail positif en se raccour-

	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

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

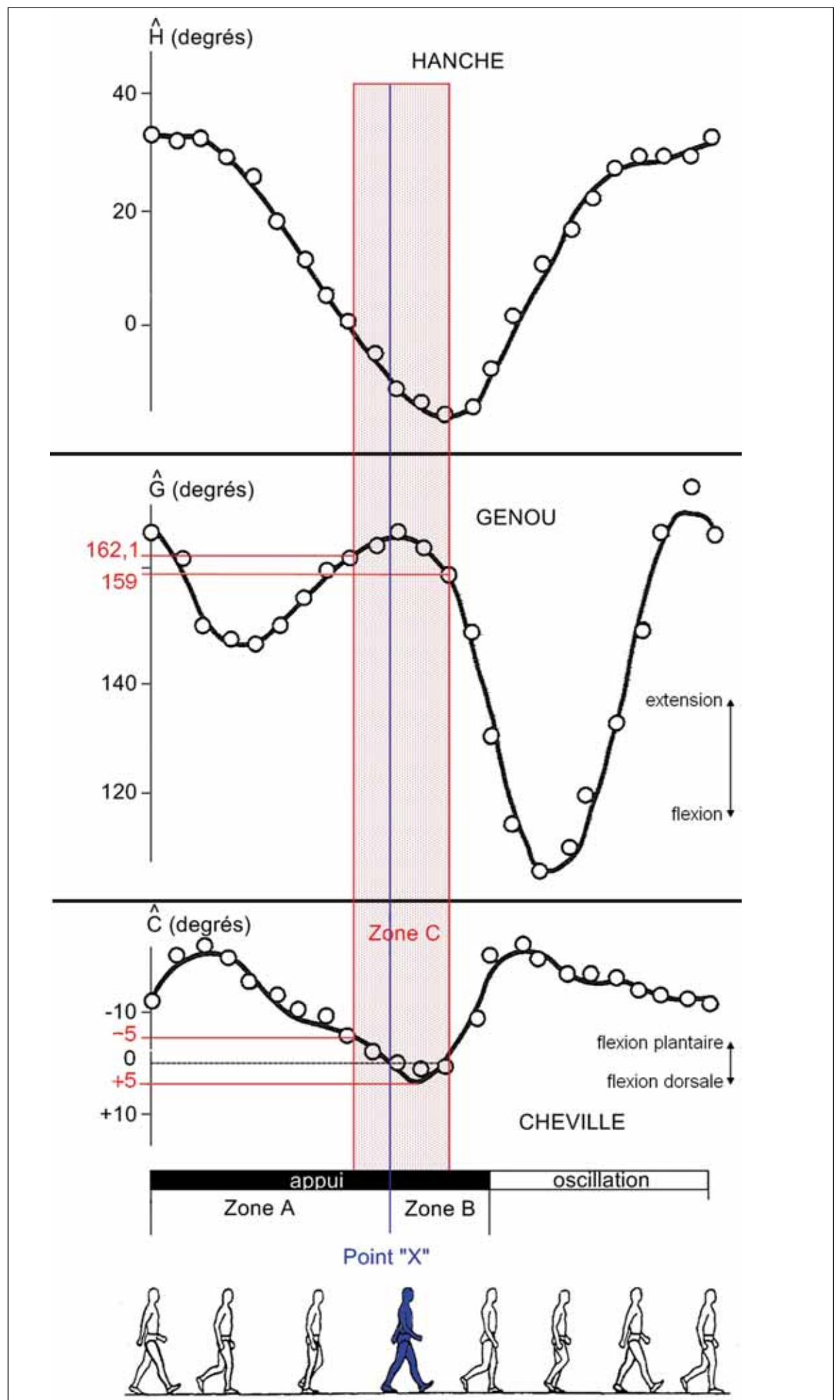


Figure 1 : évolution angulaire de la hanche, du genou et de la cheville lors du déroulement de la marche chez l'homme

cissant, alors que le second serait allongé mais sans se raccourcir ensuite, dissipant ainsi l'énergie stockée sous forme de chaleur.

## Analyse cinématique de la marche

### Introduction

Dans cette étude nous nous intéressons à la phase de la marche pendant laquelle les propriétés biomécaniques du gastrocnémien pourraient 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), entraînant une détente maximale du gastrocnémien.

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

Le pied rentre en contact avec le sol par le talon, (initial contact), 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). Le tout dernier contact se fait par le gros orteil. La figure 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 de la figure 1, à quatre instants précis : début d'appui, déroulement du pas au moment où la cheville est à  $0^\circ$  (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 1 et 2)

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

Du point X au lever du pas (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 1 et 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

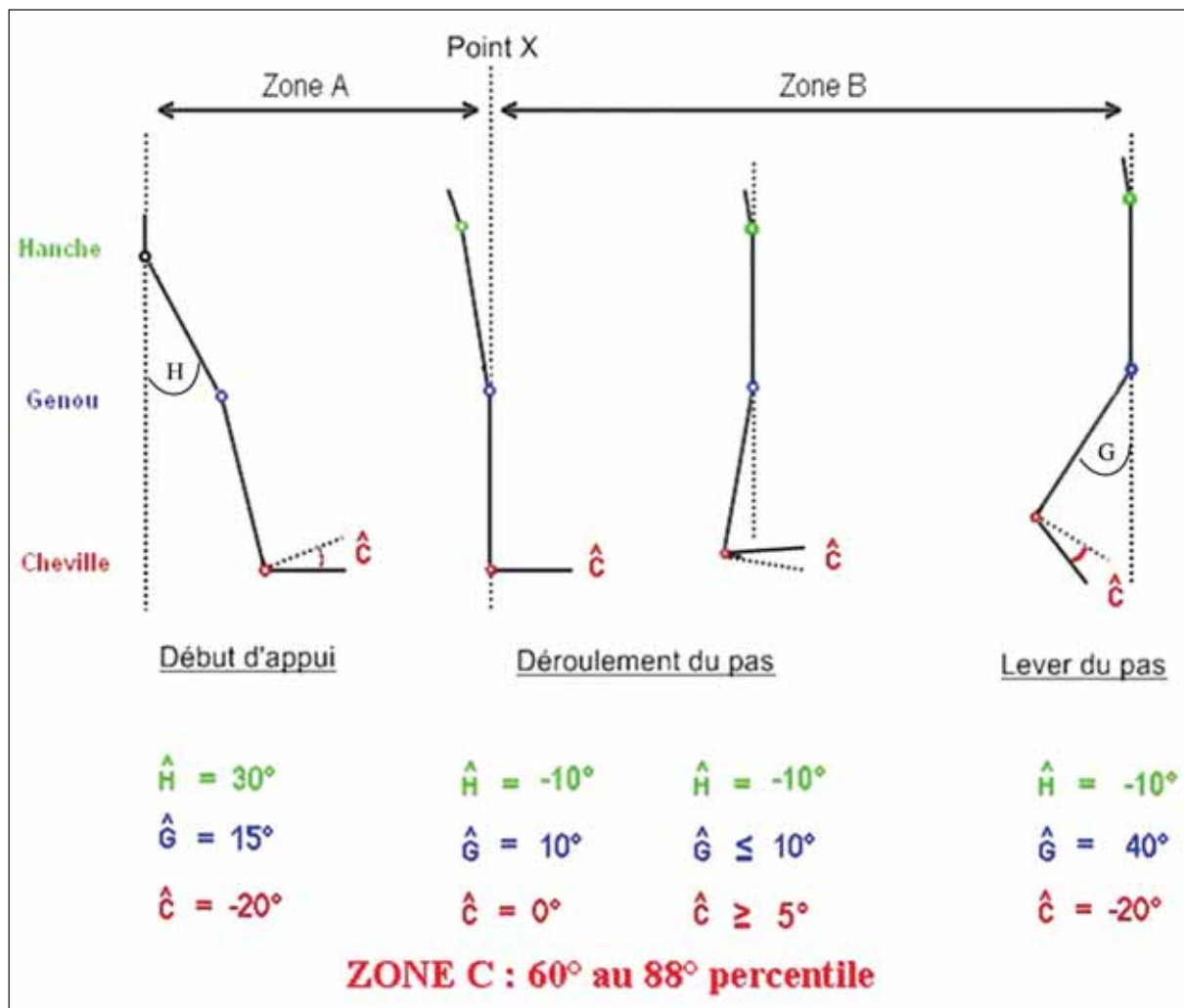


Figure 2 : modélisation du membre inférieur de l'homme sous forme de chaînes

alors parcouru 70,6 % de l'appui. En effet dans cette zone que nous nommons zone C, 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.

Dans cette zone la cheville oscille de 4 à 5° de part et d'autre de la position neutre, pour un genou qui reste en extension (entre 15 et 20° de flexion). Elle permet donc au muscle gastrocnémien, bi-articulaire d'exprimer les avantages biomécaniques développés plus haut.

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 marche : étude des réactions au sol

#### Matériel utilisé

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 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 pro-

pulsion, 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 la trajectoire du centre des pressions I, point d'application de la résultante des forces de réaction verticales qui permet de déterminer l'endroit où le pied prend contact puis quitte le sol, et ainsi de connaître la trajectoire entre ces points.

Quel est le comportement du centre de gravité dans la zone C ?

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 précé-

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

Au total, la phase C est caractérisée sur le plan dynamique par une élévation puis une chute du centre de gravité, suivie de propulsion.

### Analyse électromyographique

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 (fig 3)

L'analyse des courbes EMG montre que l'activité se fait par bouffées. Le 1<sup>er</sup> pic apparaît lors du transfert du poids au sol au début de l'appui, le 2<sup>ème</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. (fig 3)

- 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 che-

ville 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.

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).

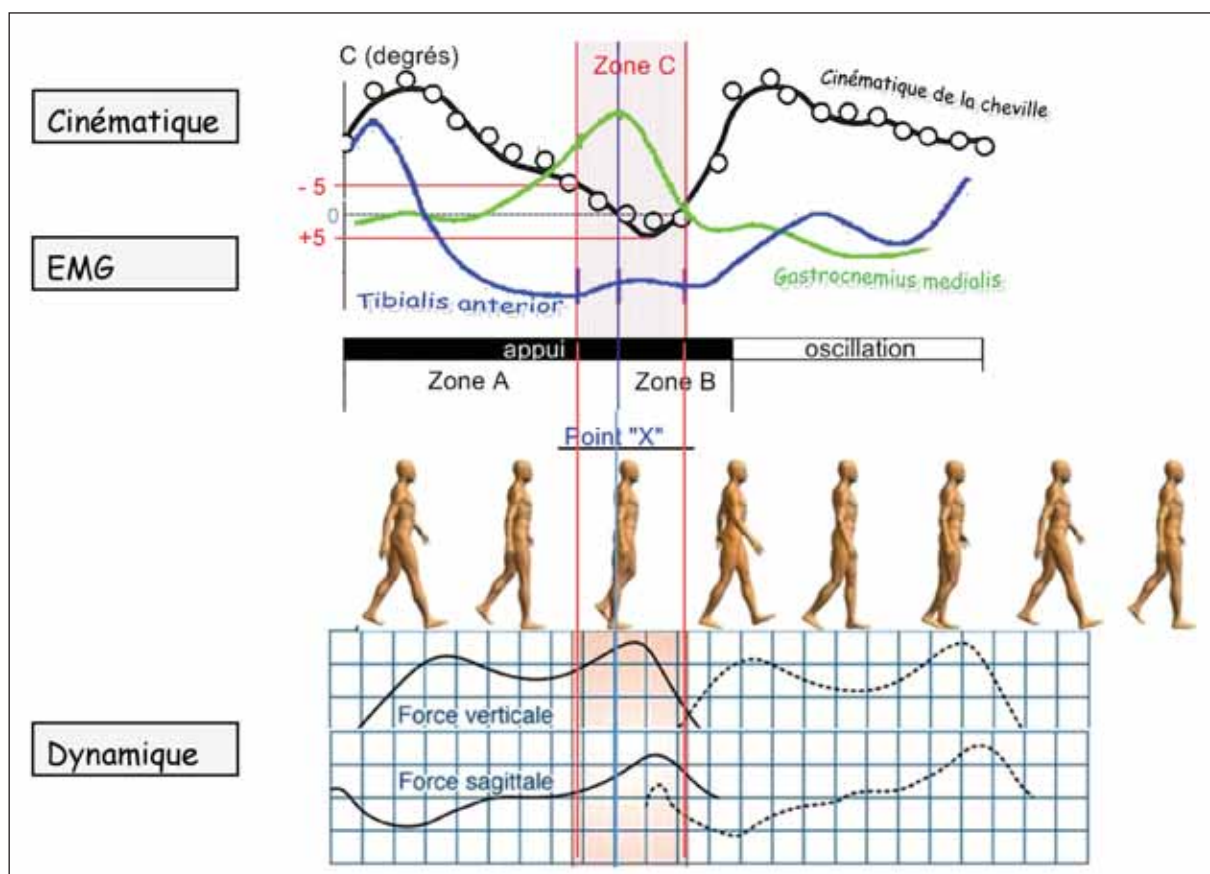


Figure 3 : comparaison des données cinématiques, dynamiques et EMG chez l'homme

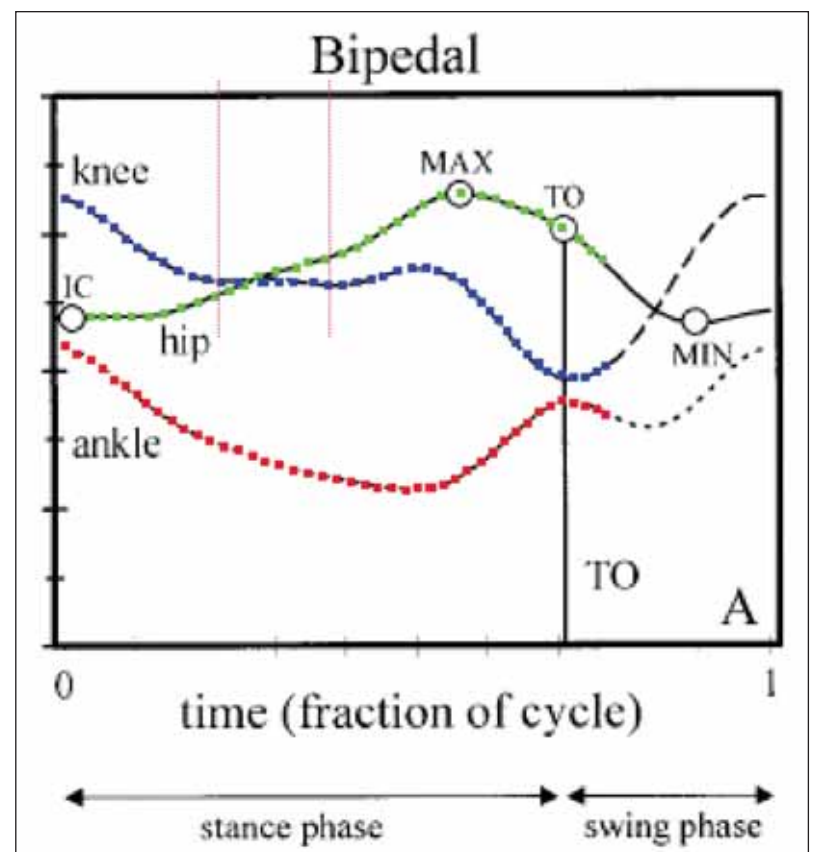


Figure 4 : évolution angulaire de la hanche, du genou et de la cheville lors du déroulement de la marche chez le Bonobo

---

---

# AGENDA

---

---

--

	Début d'appui (IC)	Déroulement du pas	Lever du pas (TO)
HANCHE	71° FLEXION	+ 30° FLEXION	+41° FLEXION
GENOU	+ 32° FLEXION	+56° FLEXION	+93° FLEXION
CHEVILLE	- [0-3°] FLEXION PLANTAIRE	+ 52° FLEXION DORSALE	+ 12° FLEXION DORSALE

Tableau 2 : valeurs angulaires des hanche, genou et cheville à trois instants de l'appui chez le Bonobo

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 propulsion, 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.

## Au total

L'analyse cinématique permet d'identifier avec précision la phase de l'appui centrée autour de la mise en flexion dorsale de la cheville. 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.

La confrontation avec les paramètres EMG montre qu'elle permet au gastrocnémien d'augmenter le rendement énergétique du système et que l'activité des releveurs de la cheville est paradoxalement absente.

L'analyse dynamique montre que la chute du centre de gravité est responsable directement de la flexion dorsale de la cheville, survenant juste avant le lever du pas, elle permet une récupération efficace de l'énergie potentielle du système en énergie cinétique, source de propulsion.

## COMPARAISON AVEC LE GRAND SINGE

Les données sont tirées de l'article de Kristiaan d'Arôut and col qui ont étudié la ciné-

matique de la marche bipède et quadrupède du Bonobo. Les angles ont été recalculés afin de pouvoir être comparés à ceux de l'homme.

La marche se fait en flexion de hanche et genou permanente, le tronc penché en avant. Les courbes d'évolution angulaire de la hanche, du genou, et de la cheville sont représentées dans la figure 4.

Analyse cinématique de la phase d'appui : (tableau 2)

La hanche et le genou sont en flexion permanente et ne peuvent jamais s'étendre.

Pour la cheville le début d'appui (IC) se fait presque à 0°, puis la flexion dorsale s'accroît pendant le déroulement de l'appui jusqu'à 52°, et revient en direction plantaire sans néanmoins dépasser 12° de flexion dorsale au moment du lever. La cheville est donc en flexion dorsale permanente. Dans la figure 5 nous avons modélisé le membre inférieur sous forme de chaînons en respectant les valeurs angulaires du tableau 2. Notons que le « midtarsal-break » n'a pas été représenté.

L'analyse du fonctionnement du couple genou/cheville nous intéresse particulièrement : bien que la cheville soit en flexion dorsale permanente, la flexion du genou pendant tout l'appui empêche à tout moment le muscle gastrocnémien de se tendre, et donc de faire bénéficier au système de ses propriétés bi-articulaires.

La phase du déroulement du pas est l'équivalente de la zone C définie chez l'homme : elle précède le lever, (TO), avant la propulsion. On s'attend à cet instant à voir réunis les paramètres biomécaniques favorisant la propulsion, mais on s'aperçoit au contraire que le gastrocnémien est en détente complète. En effet le genou est en flexion maximale et la cheville en flexion dorsale minimale. Cela illustre à quel point les mécanismes biomécaniques de la bipédie sont différents.

Il est intéressant par ailleurs de constater que le plan de coordination de la bipédie du Bonobo, très différent de celle de l'humain, est en revanche très similaire avec la quadrupédie du Bonobo.

## Analyse dynamique

Chez le Bonobo, l'amplitude verticale du centre de gravité en

respectant l'échelle, est faible, liée au fait que genoux et hanches sont en flexion permanentes ; l'absence d'extension minimise la course du centre des masses, diminuée de plus par l'ascension du calcaneus lors du déroulement du pas, responsable d'une minimisation de la longueur fonctionnelle du membre inférieur. Ce mouvement ascendant du talon est lié à la caractéristique médiotarsienne de la mobilité du pied du

grand singe ; c'est le « midtarsal break » des anglo-saxons.

Dans ces conditions, il ne peut y avoir de transfert efficace d'énergie potentielle (ascension puis chute du centre de gravité) en énergie cinétique (propulsion), caractérisant le modèle mécanique humain du pendule inversé.

Quant à la position en flexion permanente du tronc, de la hanche et de la cheville, il semble évident que la dépense énergétique en terme de moment des forces est supérieure à celle dépensée en rectitude, au détriment de la propulsion.

## CONCLUSION

L'analyse de la mise en flexion dorsale de la cheville chez

l'homme à l'appui permet de mettre en évidence les qualités biomécaniques de ce système. L'article, centré sur l'étude d'une phase précise de l'appui, tente de montrer à quel point le système humain est économique. Cela est lié à l'étroite intrication de données purement cinématiques, ici l'alternance plantaire et dorsale de la flexion de la cheville, la présence d'un muscle bi-articulaire pouvant exprimer ses fonctions, et la synchronisation parcimonieuse des bouffées EMG. Ce système, très spécialisé, diffère fondamentalement de celui des grands singes, et doit donc nous permettre de nous interroger sur notre phylogénie. ■

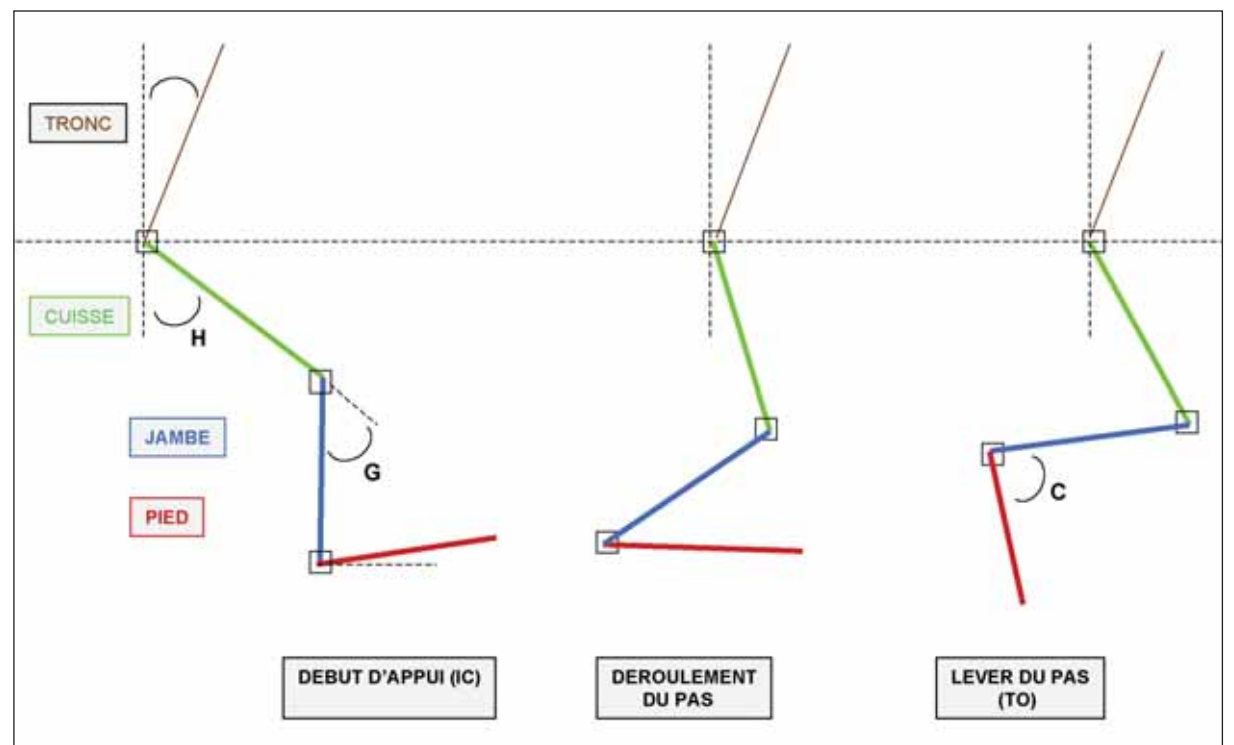


Figure 5 : modélisation du membre inférieur le Bonobo sous forme de chaînons

## BIBLIOGRAPHIE

- AOUT K., AERTS P., CLERCQ D., MEESTER K., ELSACKER L. *Segment and joint angles of hind limb during bipedal and quadrupedal walking of the bonobo (pan paniscus)*. American journal of physical anthropology, 119-37-51, 2002
- 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
- BACON, A.-M. *La locomotion des primates du miocène d'Afrique et d'Europe*
- 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
- BEAUMONT, A. CASSIER, P. *Biologie animale*. Dunod, Paris, 1987
- BOUISSET, S. *Biomécanique et physiologie du mouvement*. Masson, Paris, 2002
- BUFFETAUT, E. *Histoire de la paléontologie*. PUF, 1998
- BERILLON G. *Le pied des hominoïdes miocènes et des hominidés fossiles*. Cahiers de paléanthropologie, CNRS éditions, Paris, 2000
- BERILLON G. *Les multiples bipédies*. Pour la Science, Editions française de Scientific American, N°330, avril 2005
- 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
- CAZEAU C., STIGLITZ Y., BAROUK L.S., BAROUK P. *Analyse des conséquences biomécaniques de la brièveté du gastrocnémien sur l'avant-pied*. Médecine et chirurgie du pied. Springer, vol 22 N°2, pp 143-144
- CAZEAU C. *Faut-il s'intéresser à la bipédie ? Analyse anatomique et biomécanique dans diverses classes animales. Utilité pour la recherche de la phylogénie humaine*. Maîtrise Orthopédique, Juin Juillet 2006, N° 155
- 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
- DELOISON, Y. *Préhistoire du piéton*. Plon, 2004
- DI GIOVANNI M.D., CHRISTOPHER W., RODERICK KUO, ET AL. *Isolated Gastrocnemius tighness*. J Bone Joint Surg (Am), 2002, 84 :962-70.
- DUCROQUET, R.J. DUCROQUET, P. *La marche et les boïteries*. Masson, Paris, 1964
- HANSEN J. T. *Netter's Anatomy Flash cards*. Masson, Paris, 2004
- HILL, A.V. *The heat of shortening and the dynamic constants of muscle*. Proc. Roy. Soc. B. ,1938, 126, 136-195
- 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
- KAPANDJI, I.A. *Physiologie articulaire, membre inférieur*. Maloine S.A., 1989
- PICQ, P. COPPENS, Y. *Aux origines de l'humanité*. Fayard, 2002
- PREUSCHOFT H. *Functional anatomy of the lower extremity*. The Chimpanzee, anatomy and behaviour, vol 3. Bourne G.H. editor, 1971
- RENOUS, S. *Locomotion*. Dunod, Paris, 1994
- RODINEAU J. *Examen clinique du système propulsif achilleo-calcaneo-plantaire et morphotype de sujets à risque*. La rétraction du triceps sural.- Sauramps méd.