

La pennation musculaire (sarcomères, fibres, fascicules musculaires et aponévroses) (1^{ère} partie)

RÉSUMÉ | SUMMARY

Pendant des décennies, l'enseignement de la myologie a été traditionnel. La description classique d'un muscle faisait état d'un corps musculaire qui se poursuivait par un tendon.

La présentation académique au tableau noir et dans tous les livres d'anatomie se décomposait en origine, trajet direction et terminaison. Le corps musculaire était colorisé en rouge sans autre détail. Il en découle que ces descriptions étaient négatives et ne permettaient pas de comprendre son fonctionnement intrinsèque. À la suite de microdissections, il nous est apparu que l'on devait introduire trois notions essentielles avec : le fascicule musculaire, l'aponévrose et la pennation.

La connaissance des structures anatomiques intrinsèques doit être à l'origine d'une nouvelle pratique de rééducation de l'appareil locomoteur. La notion d'étiirement maximal est à reconstruire car risque de léser les sarcomères.

La raideur musculaire est un concept qui n'a pas encore été élucidé et qui nécessite des travaux de recherche fondamentale et d'observation sur le terrain dans la pratique de kinésithérapie.

For many decades myology teaching was traditional. The classical description of a muscle was of its belly followed by its tendon.

The academic presentation on the blackboard and in all of the anatomy books consisted of the muscles origin, its direction and its insertion. The muscle belly was colored in red without any other details. It seems that these descriptions were negative and didn't allow one to understand the muscles intrinsic function. Micro-dissection has showed us that there are three essential notions which should be introduced: the muscle fascicle, the aponeurosis and the pennation.

A new rehabilitation program for the musculoskeletal system must be based on knowledge of intrinsic anatomical structures. The notion of maximal stretching should be reconsidered due to the risk of sarcomere lesion.

Muscle stiffness is a concept that has not yet been elucidated and requires further research and clinical observation in physiotherapy practice.

Pr François BONNEL

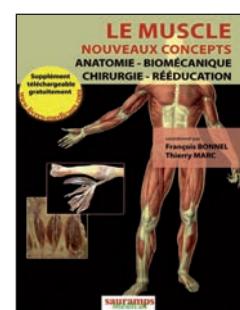
Professeur à la Faculté

Service de Chirurgie orthopédique
Clinique Beau Soleil
Montpellier (34)

Texte issu de la 13^e Journée nationale de rééducation d'Hauteville

L'auteur déclare ne pas avoir un intérêt avec un organisme privé industriel ou commercial en relation avec le sujet présenté

Article extrait de l'ouvrage « *Le muscle. Nouveaux concepts* » de F. Bonnel. Sauramps Médical, 2009, avec leur aimable autorisation de reproduction.
www.livres-medicaux.com



MOTS CLÉS | KEYWORDS

► Aponévrose ► Fascicules ► Muscle ► Pennation

► Aponeurosis ► Fascicles ► Muscle ► Pennation

L'iconographie de l'anatomie traditionnelle de l'appareil locomoteur est en continuité avec les présentations de Vésale [1]. Les descriptions des muscle reposent toujours sur la conception de l'unité muscle tendon avec deux parties, une partie centrale ou corps musculaire de couleur rougeâtre et une partie extrême qui répond aux raccordements par l'intermédiaire de tendons.

Nous ne développerons pas la structure tendineuse dont les bases anatomiques sont bien codifiées. Cette morphologie extérieure doit être complétée par des notions plus précises. Les progrès sur l'évaluation du muscle en histologie et physiologie font appel à des structures qui n'ont été l'objet jusqu'à présent d'aucun développement dans les traités anatomiques à grande diffusion.

La prise en considération des structures intimes du muscle avec la pennation et les aponévroses permettra grâce à une meilleure connaissance la naissance de nouvelles techniques thérapeutiques. Lieber [2] a depuis plusieurs années attiré l'attention des chirurgiens pour mesurer la tension du sarcomère lors de la réalisation des transferts tendineux.

Les travaux importants sur la force du muscle ont été réalisés par les anatomistes allemands à la fin du XIX^e siècle et au début du XX^e siècle. Fick [3], Von Lanz et Wachsmuth [4] ont exploité les relations entre la taille d'un muscle et la force musculaire.

Le concept physiologique de « cross section » d'un muscle de Weber [5] et de Fick [3] caractérise l'importance de cette notion de tous les fascicules d'un muscle en rapport avec sa tension maximale, la cross section area étant difficile à mesurer sur le cadavre. La littérature est très prolifique et les travaux fondamentaux essentiels sont le fruit des recherches multiples dont ceux de Lieber [2] (Veterans affairs medical center de l'Université de Californie de San Diego school of medicine aux États-Unis).

SÉMANTIQUE [6, 7]

Les paramètres anatomiques architecturaux sont la longueur musculaire globale, la longueur des fascicules anatomiques, la longueur de la fibre musculaire et l'angle de pennation qui est l'angle que fait la fibre musculaire à l'axe de traction de l'aponévrose.

La pennation musculaire (sarcomères, fibres, fascicules musculaires et aponévroses) (1^{ère} partie)

La longueur du muscle se définit comme la distance entre l'insertion proximale de la fibre musculaire et son insertion distale. Cette mesure est variable selon la torsion des fibres.

La longueur de la fibre musculaire ne peut être déterminée que par microdissection après fixation. Une fibre musculaire est constituée de 500 à 10 000 myofibrilles en parallèle.

Le fascicule musculaire est la somme de plusieurs fibres musculaires, en effet il est difficile par microdissection d'isoler une fibre musculaire intacte. Le fascicule musculaire peut contenir de 5 à 50 fibres.

Il serait souhaitable de distinguer les « fascicules musculaires anatomiques » des fibres musculaires fonctionnelles ». Sur le plan fondamental, le fascicule anatomique n'est pas obligatoirement représentatif de la fonction réelle du muscle qui ne peut être identifié qu'histologiquement [2].

La détermination de fibres musculaires longues ou courtes dépend de la méthode de fixation en conséquence la mesure de la longueur du sarcomère est d'interprétation difficile.

s'interconnecter pour glisser l'une par rapport à l'autre. L'énergie permettant leur mouvement provient de l'hydrolyse de l'adénosine triphosphate fixée sur la tête de la myosine qui bascule. Ce basculement tire l'actine sur la bande M et provoque le raccourissement.

Chaque myofibrille est composée de 1 000 à 2 000 000 de sarcomères en série de 2 à 3 micromètres de longueur et 1 micron-mètre de diamètre [2, 11].

Le fascicule musculaire d'un biceps peut contenir plus de 100 000 sarcomères. Le raccourissement d'un sarcomère peut aller jusqu'à 1 micron-mètre, ce qui aboutit à un raccourissement de 10 cm.

Chez le solaire du rat, le nombre de sarcomère en série augmente de 2 200 à 2 600 la cheville en dorsiflexion et diminue à 1 800 sur une cheville immobilisée en flexion plantaire.

La réactivité d'un muscle lors de la croissance ou d'une période d'immobilisation ne peut être interprétée que dans la mesure où l'on connaît le type de fascicules musculaires et la disposition des sarcomères.

Expérimentalement, Huijing [12] a étudié le degré d'atrophie des muscles chez le rat (solaire, gastrocnémien) dans ces deux situations. Les résultats ont mis en évidence que la structure intrinsèque de ces deux muscles était différente.

Pour le muscle solaire, les sarcomères disposés en parallèle et en série se sont bien adaptés dans leur réactivité. À l'inverse, pour le muscle gastrocnémien, seuls les sarcomères en parallèle s'adaptent aux circonstances. Il en conclut que l'architecture du muscle a un rôle considérable pour expliquer ces différents comportements sans entraîner de modification de la longueur des fascicules musculaires.

Nous approchons, au vu des conclusions de cette expérimentation, les lacunes fondamentales de la méconnaissance de la structure intime anatomique des muscles pour interpréter les constatations cliniques.

LES OUTILS : morphologie intrinsèque du moteur

Le fascicule est l'unité fonctionnelle macroscopique et le sarcomère l'unité fonctionnelle histologique.

L'organisation universelle est constituée des sarcomères qui se regroupent sous forme de myofibrilles qui vont à leur tour constituer les fascicules musculaires.

Sarcomère et myofibrilles

Depuis la détermination de la structure microscopique du muscle strié par diffraction aux rayons X en 1950, des études expérimentales ont été réalisées pour découvrir le mécanisme moléculaire de la contraction [6-10].

Il existe un consensus sur l'organisation générale de la contraction bien que, dans le détail, beaucoup d'investigations soient encore en état d'interrogation. Le muscle se caractérise par la présence au niveau du sarcomère de protéines contractiles actine et myosine qui se disposent de façon à

Fascicules musculaires

Le terme générique de fascicule est un ensemble fonctionnel de sarcomères selon les termes discutés par Huxley [6] et Squire [7].

La forme particulière fusiforme de beaucoup de muscles donne une fausse image de la véritable longueur des fascicules musculaires. L'observation des muscles avant dissection donne l'impression qu'un fascicule s'étend d'une partie extrême du muscle à l'autre.

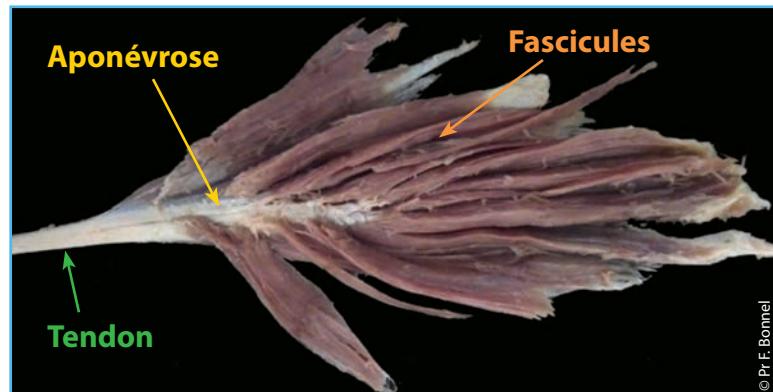
Après une dissection spécifique l'on peut mettre en évidence la disposition particulière de chaque fascicule musculaire. Il ne faut pas juger de la longueur des fascicules d'un muscle long par la longueur du corps charnu apparent à l'exception du muscle sartorius qui est le muscle le plus long du corps humain.

Chez l'homme, la longueur des fascicules est en moyenne de 4 à 5 centimètres, les plus longs sont de 10 à 15 cm et leur longueur est très variable. L'axe du muscle n'étant pas le même que celui des fascicules qui le compose, on doit étudier dans chaque muscle la direction des fascicules musculaires par rapport aux aponévroses et au tendon (fig. 1 et 2).

La longueur des fascicules est pour les muscles moyen fessier de 8 à 19 cm, petit fessier de 1 à 10 cm, grand fessier de 1 à 5 cm, grand adducteur de 3 à 5 cm, long adducteur de 1 à 6 cm, iliaque de 10 cm, psoas de 10 cm, piriforme de 2 à 6 cm, droit de la cuisse de 8,4 cm, semi-membraneux de 8 cm, semi-tendineux de 20 cm, biceps fémoral de 10 cm, gracile de 35 cm, sartorius de 57 cm, tenseur du fascia lata de 9 cm, vaste médial de 9 cm, vaste intermédiaire de 8 cm, vaste latéral de 8 cm, gastrocnémiem médial de 5 cm, gastrocnémien latéral de 6,5 cm, solaire de 3 cm, tibial postérieur de 3 cm, court fibulaire de 5 cm, long fibulaire de 4,9 cm et tibial antérieur de 9,8 cm.

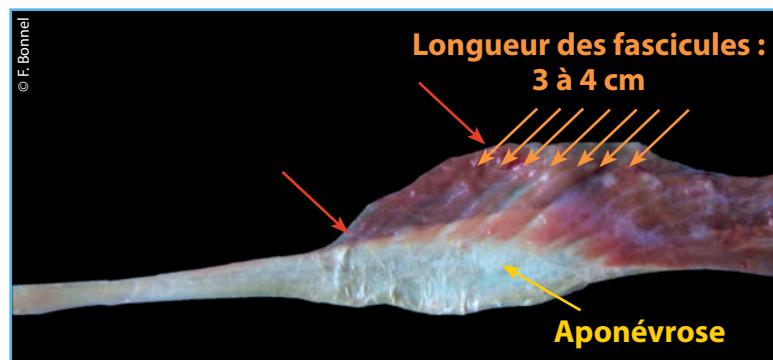
La constitution musculaire répond à une disposition basée sur des modèles fondamentaux avec des fascicules parallèles, des fascicules convergents et des fascicules à disposition tridimensionnelle [3, 13-15]. Lorsque ces modèles s'associent, ils aboutissent à une organisation musculaire anatomique complexe d'une potentialité fonctionnelle fabuleuse.

Bien que toutes les fibres musculaires soient constituées de manière homologue à partir du modèle associant les protéines contractiles avec plusieurs types dont les propriétés biochimiques et physiologiques apparaissent différentes fibres lentes type I (ST : slow twitch), et fibres rapides type II (FT : fast twitch), subdivisées en a (*fast resistant*)



► Figure 1

Microdissection d'un muscle de l'avant-bras mettant en évidence les éléments constitutifs et leur dénomination



► Figure 2

Organisation des fascicules musculaires et leur insertion sur l'aponévrose
In: Bonnel F. *Le muscle. Nouveaux concepts*. Sauramps Médical, 2009

et b (*fast fatigable*). Les premières développent théoriquement une force par unité de surface plus faible que les secondes qui sont capables d'entraîner un raccourcissement plus rapide.

La disposition des points d'impact de ces fibres dans le muscle sont très nombreuses et mal connues. Leur approche anatomique descriptive est très grossière.

■ Endomysium et périmysium —

La microscopie électronique du muscle dans les fascicules musculaires montre que l'endomysium est un tissu collagénique continu qui permet d'individualiser les fascicules musculaires. L'endomysium forme une partie importante du mécanisme d'isolation des fascicules musculaires ou constitue la partie externe ou feuillet réticulaire du sarcolemme.

■ Aponévrose —

L'aponévrose est l'élément complémentaire indissociable du muscle. Si le tendon s'insérait directement sur les fascicules musculaires, il s'ensuivrait

une rupture lors de la contraction musculaire. Pour cette raison, les fascicules musculaires vont s'insérer sur toute la longueur de l'aponévrose qui représente comme nous l'avons constaté 95 % de la longueur de tous les muscles.

Dans certaines configurations, les segments aponévrotiques intramusculaires peuvent être subdivisés avec des ramifications en un nombre quelconque de petits segments ou être groupés en un tout (loi de commutativité et associativité).

PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES OUTILS

■ Le sarcomère et la titine

Le sarcomère développe une force par raccourcissement, dont l'évaluation physiologique globale est variable selon la disposition en série ou en parallèle. Un nombre élevé de sarcomères en série entraîne une grande vitesse lors de la contraction et pour un grand nombre de sarcomères en parallèle une grande puissance. L'importance de la compliance des sarcomères réside dans la présence des connexions entre les fibres d'actine et les ions calcium.

La longueur des sarcomères est différente selon la position de l'articulation : pour le muscle *extensor carpi radialis brevis*, elle est de 9,1 nm, et pour le muscle *extensor carpi radialis longus*, elle est de 4,7 nm. Le contrôle des déplacements lors de la contraction est régulé par la titine. Lors de la contraction, la titine présente une mise tension passive de régulation fine.

Lors de l'étirement du sarcomère, cette titine génère une force capable de s'opposer à la tension d'étirement. Le dépassement de la tension physiologique provoque une rupture du pont actine-myosine avec lésion physique du sarcomère [16]. Selon le type de muscle, la titine a des propriétés mécaniques différentes.

■ La fibre musculaire et fascicule

Les composants du muscle se raccourcissent en moyenne dans le rapport 2/3 de sa longueur pouvant aller jusqu'à 50 %. Ainsi les muscles qui passent devant une articulation doivent avoir des fibres musculaires fonctionnelles trois fois plus

longues que la distance d'insertion de part et d'autre de cette articulation corrélée au raccourcissement pendant la réalisation complète du mouvement. Cette longueur leur permet d'exercer une force maximale quand le mouvement commence et reste avec une certaine force quand le mouvement maximum est atteint.

Cette relation entre la longueur des fibres musculaires (sarcomères) et l'amplitude du raccourcissement est un élément important à prendre en considération dans la réalisation d'un transfert tendineux. Un exemple de l'insuffisance musculaire est l'incapacité des muscles extenseurs des doigts à étendre les articulations interphalangiennes quand le poignet est en extension complète. Le rendement musculaire est meilleur quand le muscle s'insère près de l'articulation.

Quand la distance de l'axe articulaire au point d'insertion sur le segment osseux est supérieure à 25 % de la longueur du segment osseux, la flexion complète n'est plus possible [17].

Les études sur les propriétés mécaniques des fibres musculaires isolées ont montré le rôle important des composants des séries élastiques localisées dans ces fibres et particulièrement au niveau des zones de jonction intramusculaire. Cependant la comparaison des valeurs à l'elongation comme une conséquence de la force optimale exercée obtenue dans les fibres ou fascicules et dans un muscle intact arrive généralement à la conclusion que la majeure partie de ces composants doivent être localisés en dehors des fascicules musculaires à savoir dans le tendon ou dans les aponévroses.

Les fibres musculaires sont constituées d'unités contractiles élémentaires (sarcomères mis en série ou en parallèle) et il en résulte que la vitesse de raccourcissement du muscle est d'autant plus grande qu'il est plus long, parce qu'il comporte plus de sarcomères. La relation $V_{max} = 10 \times LF \text{ sec}^{-1}$ pour une contraction sans résistance signifie que pour les muscles longs comportant un grand nombre de sarcomères, la vitesse maximale de raccourcissement est égale à 10 fois la longueur des fibres musculaires par seconde (un muscle qui aurait des fibres d'une longueur de 10 cm aurait, en l'absence de toute résistance, une vitesse maximale de raccourcissement de 100 cm/s).

Décrise dès 1891 par Blix [18] sur le muscle isolé et tétanisé la relation force longueur caractéristique

montre que jusqu'à une longueur de référence la force croît avec la longueur au-delà de cette longueur de référence (longueur limite) surviennent des ruptures de la structure. Les relations force-longueur de la composante contractile diffèrent selon le pourcentage lent ou rapide.

Sur un gastrocnémien de grenouille (muscle lent) la force ne diminue pas rapidement avec la longueur : le muscle présente ainsi une gamme assez étendue de longueur pour lesquelles sa force maximale reste constante alors qu'un muscle rapide comme le fléchisseur de l'hallux présente un optimum de force pour une plage relativement étroite de longueur. Ceci permet à un muscle postural comme le gastrocnémien de développer une force maximale pour une gamme importante de position articulaire. Cette efficacité étant la fonction posturale est renforcée par le développement d'une tension passive ne consommant pas d'énergie chimique pour les faibles longueurs.

■ L'endomysium et le périmysium

Pour le sarcolemme, des fibres isolées, il a été montré que l'endomysium contribue à la fonction statique élastique après avoir été étiré d'environ 140 à 150 %. Il contribue aussi à l'élasticité et à la viscosité du complexe musculaire, il est admis que la somme du tissu conjonctif augmente la compliance du muscle en complément de celle propre des fascicules musculaires et du tendon.

En raison de la tension qui est transmise au travers des fibres aponévrotiques de surface à l'endomysium, les propriétés mécaniques de ce tissu conjonctif sont un facteur contribuant de façon à améliorer les propriétés mécaniques du muscle.

L'endomysium transfère les contraintes entre les fascicules discontinus du muscle au travers des faisceaux trans endomysiaux. En opposition avec les forces importantes de tension des fibres collagènes sur laquelle les fascicules musculaires s'attachent seuls les feuillets translaminaires subissent des forces de cisaillement de l'endomysium.

Chaque fibre musculaire est entourée par un tissu fibreux (périmysium) qui s'organise en alvéoles qui par leur adhérence sont autant de zones de transmission élastique progressive des contraintes mécaniques de cisaillement.

■ L'aponévrose : structure fondamentale

Au niveau de l'aponévrose, il n'existe pas de zone d'extension uniforme au cours des mouvements passifs ou actifs [19]. Ces variations de tension selon les contraintes axiales ont été déjà observées pour les tendons, les ligaments et les fascias.

Pour l'aponévrose, il apparaît que les forces de tensions étaient plus hautes aux deux extrémités du muscle que dans sa partie moyenne. Le comportement de l'aponévrose varie entre les mouvements passifs et les mouvements actifs. Lors d'un mouvement passif de l'articulation, l'aponévrose se déforme plus dans le sens de la longueur et moins dans le sens de la largeur.

Les connaissances concernant les propriétés élastiques de l'aponévrose sont essentielles pour la compréhension des modifications de la longueur du fascicule ou du sarcomère dans le muscle. Par exemple, lorsqu'on modélise le complexe muscle-tendon durant les variations de longueur du muscle la différence observée dans les modifications entre les fascicules et la longueur musculaire a été attribuée à la composante de compliance élastique de cette aponévrose dans le muscle [20, 21].

Les principales études mécaniques sur les propriétés élastiques d'un muscle ont porté essentiellement sur les structures tendineuses qui étaient isolées du reste de l'élément musculaire [22-24]. Les études comparatives concernant le mode de réaction de l'aponévrose lors d'une contraction musculaire ou lors des étirements passifs ont montré que les caractéristiques de cette aponévrose différaient de façon importante : lors d'un mouvement passif il y a plus de longueur d'aponévrose intéressée pour les forces faibles que comparativement pour les activités musculaires de contraction.

La différence de longueur peut être supérieure à 1,25 millimètres pour approximativement 6 % de la longueur de l'aponévrose d'un muscle avec une longueur optimale. Lors d'une contraction isométrique d'un muscle, la longueur de l'aponévrose qui augmente est limitée à environ 3,5 %. Lors de cette contraction isométrique, la dépense énergétique de l'aponévrose est évaluée à 2,8 micro-joules.

En tant qu'élément passif, cette constatation peut paraître paradoxale. Bien que passive, toute structure lors d'un déplacement est soumise à une modification intime cellulaire qui s'accom-

La pennation musculaire (sarcomères, fibres, fascicules musculaires etaponévroses) (1^{ère} partie)

pagne de variations métaboliques cellulaires qui dégagent une énergie, soit sur le mode d'une perte ou d'une récupération.

Selon un modèle plus abordable, l'on peut comparer l'aponévrose à un élastique qui, mis en tension au-delà de sa longueur, emmagasine une force (nécessitant une dépense énergétique pour sa mise en tension) qui, lors de l'arrêt de la tension, retrouvera sa longueur initiale et en conséquence, restitue l'énergie emmagasinée lors de la mise en tension.

Lorsque la force décroît depuis la force maximale (longueur optimum) jusqu'à une force égale à sa résistance passive (état initial), l'aponévrose diminue de longueur de 9 %, d'où il résulte un travail résultant de 4,8 micro-joules. Expérimentalement, il a été démontré que le tendon calcanéen apparaît être considérablement plus rigide que les structures aponévrotiques qui sont les éléments constitutifs essentiels du muscle triceps sural. En effet, la dissection du triceps sural montre une aponévrose qui occupe 95 % de la longueur du triceps dans sa globalité.

Cette disposition anatomique est mal connue mais est fondamentale dans le cadre de la fonction. Lors de la station debout, l'aponévrose se comporte comme une corde passive qui maintient l'équilibre articulaire sans faire intervenir la contraction musculaire qui entraînerait un haut niveau de dépense énergétique.

Au cours d'un mouvement, la variation de longueur de l'aponévrose a été considérée comme un important facteur expliquant la différence des modifications de longueur du muscle. Pour Lieber [2] durant les mouvements passifs la contrainte au niveau de l'aponévrose est de 8 % et plus important que la contrainte au niveau du tendon qui est de 2 % pour le muscle semi-tendineux de la grenouille.

Huijing [12] a démontré une plus grande extension de l'aponévrose du gastrocnémien chez le rat lorsque le muscle est en contraction. Pour le même effet mécanique, le tendon avait montré une tension de 3 à 4 % ce qui indiquait que la compliance de l'aponévrose était différente de celle du muscle. L'allongement du muscle dépend des propriétés de l'aponévrose qui peut être un élément important comme facteur de stockage de l'énergie et de son relargage durant la contraction musculaire.

L'énergie élastique stockée durant l'elongation passive d'un muscle est très faible environ 0,04 micro-

joules à cause des niveaux faibles des forces. Si le muscle est activé l'aponévrose s'allonge d'environ 2 % entraînant un stockage de l'énergie des structures élastiques de 0,56 micros-joule. Si la force musculaire est nécessaire pour raccourcir les fascicules la force exercée sur l'aponévrose sera réduite. Ceci a pour conséquence que l'énergie relarguée de 3,5 micro-joules peut être obtenue si l'aponévrose suit la courbe de déplacement force longueur au cours de la contraction isométrique d'un muscle.

Les propriétés de l'aponévrose qui viennent d'être décrites ouvre un champ important pour les applications de la modélisation architecturale d'un muscle. On doit en conséquence pour la modélisation musculaire incorporer la rigidité des aponévroses pour des elongations inférieures à 10 %.

Le comportement de la longueur du muscle ainsi que de l'aponévrose a un rôle important dans le stockage de l'énergie avec sa restitution lors du retour à l'état initial à la fin de la période dynamique contractile du muscle. L'énergie élastique stockée durant l'allongement passif est très faible (environ 0,04 micro-joule) en raison des petits niveaux de la force, si le muscle est activé selon une certaine longueur, l'aponévrose est étirée d'environ de 2 % entraînant un stockage d'énergie élastique de 0,56 micro-joule.

Pour un muscle actif si la force musculaire diminue la force exercée sur l'aponévrose est également réduite cela a pour conséquence un relargage de l'énergie de 3,15 micro-joules. L'origine de cette restitution d'énergie est encore obscure, mais peut être sous la dépendance de la jonction aponévrose-tendon.

ASSEMBLAGE DES OUTILS : la pennation, pourquoi ?

Morphologie universelle

Les fascicules musculaires s'implantent directement ou obliquement sur une aponévrose comme les barbes d'une plume sur leur tige commune : penniforme en forme de plume, de penna : plume (fig. 3).

Cette disposition n'avait pas échappé à Borelli [25] et Stenonis [26]. À la précision anatomique encore limitée à leur époque, ils avaient justifié les principes mécaniques inhérents qui faisaient apparaître les fondements du fonctionnement musculaire actuel.

Les dissections des muscles des membres montrent dans tous les cas la présence d'une aponevrose. Sur l'aponevrose, on note deux types de fascicules musculaires les uns qui s'insèrent dans l'axe principal de l'aponevrose et les autres qui s'insèrent latéralement sur l'aponevrose selon le principe d'un muscle unipenné ou bipenné. Sur un plan global, les insertions des fascicules musculaires se disposent dans les trois plans de l'espace.

La justification de cette disposition a deux fonctions : la première est le développement constant d'un mouvement de flexion ou d'extension avec une certaine amplitude en fonction de la longueur des fascicules. La deuxième est basée sur le principe du maintien en permanence de la tension de l'aponevrose qui permet aux fascicules musculaires de se trouver en tension permanente pour un rendement maximal quelle que soit la position de l'articulation.

■ Muscle à fascicules parallèles : pseudo-penniformes

Les fascicules musculaires ont entre les deux zones d'insertion la même direction avec des fascicules parallèles. Cette disposition est idéale sur le plan mécanique et a un rendement maximal. Elle nécessite une contraction simultanée de tous les sarcomères en parallèles ou en série. Cette disposition anatomique est rencontrée pour quelques muscles : carré pronateur, cutané palmaire, pectiné, court fléchisseur des orteils.

■ Muscle unipenné

Le muscle est semipenniforme ou unipenné, quand les fascicules musculaires s'implantent sur un côté de l'aponevrose l'autre côté restant libre.

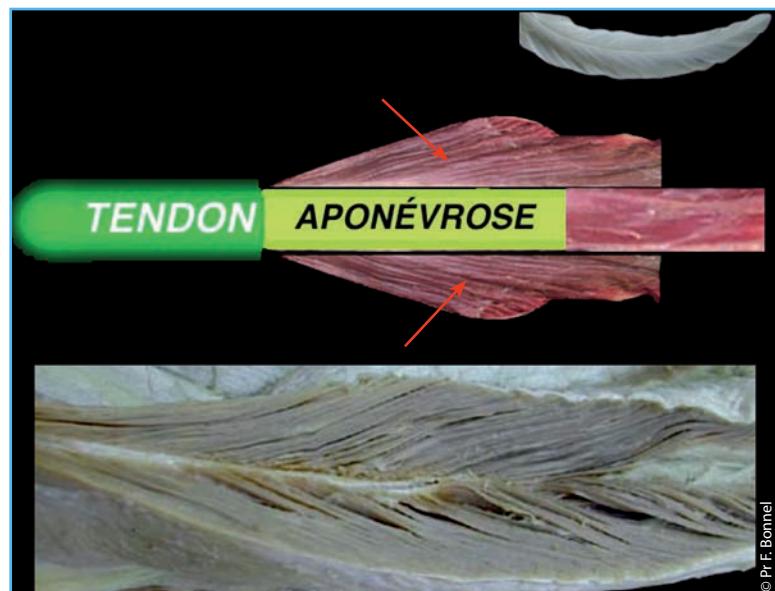
■ Muscle bipenné

L'aponevrose se prolonge sur une grande distance et les fascicules musculaires s'orientent obliquement sur les deux faces de l'aponevrose (fig. 4 et 5).



► Figure 3

Anatomie de la pennation musculaire



► Figure 4

Exemple de muscle bipenné



► Figure 5

Noter les tissus blanchâtres qui correspondent à l'aponevrose et sa situation intra-musculaire

■ Économie topographique

Les muscles ayant à développer des efforts assez considérables devraient avoir une grande section transversale avec des fascicules parallèles ce qui nécessiterait une insertion osseuse étendue et non punctiforme. Mais la place faisant défaut pour loger un muscle trop large et épais, un artifice a été trouvé par une disposition oblique sur toute la longueur de l'os et de l'aponévrose laquelle poursuit par un tendon qui est l'organe de transmission.

Chaque muscle a deux extrémités et dans la majorité deux tendons, l'un d'origine et l'autre terminal et comme d'autre part chacun de ces deux tendons peut avoir, par rapport aux fascicules musculaires une disposition particulière, l'on peut présager des innombrables variétés que présentent dans leur constitution les muscles striés.

Si tous les fascicules musculaires étaient parallèles et de même longueur ils seraient obligés de se contracter en même temps pour produire un déplacement articulaire ce qui en limiterait l'amplitude. La répartition des fascicules sur toute la longueur de l'aponévrose qui occupe 80 à 50% de la longueur totale du complexe musculaire autorise la mise en jeu mécanique progressive des fascicules musculaires au cours du mouvement de l'articulation avec une variation de l'angle de pennation.

L'angle de pennation a une influence sur la vitesse de raccourcissement. À longueur de sarcomère identique, un muscle penné présente une vitesse de raccourcissement inférieure à celle d'un muscle à fascicules parallèles. La prise en compte de l'architecture du muscle est indispensable si l'on veut, par exemple, corrélérer données mécaniques et données biochimiques.

La plupart des muscles squelettiques passent au devant d'une ou plusieurs articulations et le raccourcissement des fascicules musculaires induit une modification de l'angle de pennation.

Dans une étude échographique, Fukunaga [27] a mesuré la longueur et l'angle des fascicules musculaires du muscle vaste latéral et observé les modifications la longueur des fascicules et l'angle de pennation pendant l'extension du genou.

Quand le genou était en extension sans contraction musculaire la longueur des fascicules augmentait d'environ 18 % de 129 ± 9 millimètres et diminuait (relaxation) à 67 ± 8 millimètres à 30°.

Quand les muscles extenseurs du genou se contractaient avec 10 % de contraction maximale volontaire à différents angles articulaires, la longueur des fascicules diminuait, et l'angle était de 21° quand le genou était près de l'extension complète et de 14° dans la position de flexion.

L'angle de pennation du muscle vaste latéral a été noté entre 5 et 20° pour Yamaguchi [24] et de 6 à 27° chez le sujet vivant par Larson [28]. La force transmise par le muscle au tendon est corrélée à l'angle de pennation, plus l'angle de pennation est grand moins la force de tension sera importante et à l'inverse un angle de pennation aigu augmente sa puissance.

La disposition des fascicules avec un angle de pennation en rotation augmente sa puissance [27, 28]. Dans la position d'extension l'augmentation de l'angle de pennation des fascicules musculaires entraîne une diminution de la force musculaire.

■ Spécificité topographique

Pour les muscles des ceintures, l'aponévrose centrale est importante et les fascicules musculaires qui s'insèrent sont de type unipenné ou bipenné.

Pour les muscles du segment intermédiaire (bras, cuisse, jambe), il existe deux catégories entre les fléchisseurs et les extenseurs. Pour les extenseurs, les aponévroses se disposent sous la forme de deux lames résistantes sur lesquelles s'insèrent des fascicules musculaires courts qui s'intègrent dans la catégorie des muscles antigravitairement unipennés. Dans ce cas, les deux aponévroses sont larges, aplatis et orientées en miroir. Ces muscles sont très puissants, moins rapides, et à déplacement limité.

Pour les muscles distaux fléchisseurs (avant-bras, jambe) l'aponévrose centrale constante occupe entre 90 et 95 % de la longueur totale du muscle de son origine à sa terminaison.

Pour les muscles intrinsèques (main, pied) la disposition, toute proportion gardée, est comparable aux muscles des ceintures avec une aponévrose centrale et une disposition des fascicules selon le mode unipenné ou bipenné.

■ Variabilité des angles de pennation

L'insertion des fascicules musculaires sur l'aponévrose est l'élément essentiel de l'organisation du muscle et de son fonctionnement.

Chez les mammifères, l'angle de pennation varie de 0° à 30°. L'angle de pennation chez l'homme est pour les muscles moyen fessier de 8° à 19°, petit fessier de 1° à 10°, grand fessier de 5°, grand adducteur de 3° à 5°, long adducteur de 6°, iliaque de 7°, psoas de 8°, priforme de 10°, droit de la cuisse de 5°, semi-membraneux de 15°, semi-tendineux de 5°, biceps fémoral de 1°, gracile de 3°, sartorius de 0°, tenseur du fascia lata de 3°, vaste médial de 5°, vaste intermédiaire de 3°, vaste latéral de 5°, gastrocnémien médial de 17°, gastrocnémien latéral de 8°, soléaire de 25°, tibial postérieur de 12°, court fibulaire de 5°, long fibulaire de 10° et tibial antérieur de 5°.

L'angle de pennation obtenue par IRM était pour le muscle vaste médial à sa partie proximal de 5° et à sa partie distale de 50°.

Pour le muscle semimembraneux, l'angle de pennation est plus petit et varie de 10° à 20°.

La longueur des fascicules musculaires obtenue par étude anatomique était de $8,97 \pm 0,46$ cm et par IRM de $9,01 \pm 2,04$ cm, et pour le semi-membraneux par mesure anatomique de 6,44 cm, et par mesure par IRM de 8,16 cm [29].

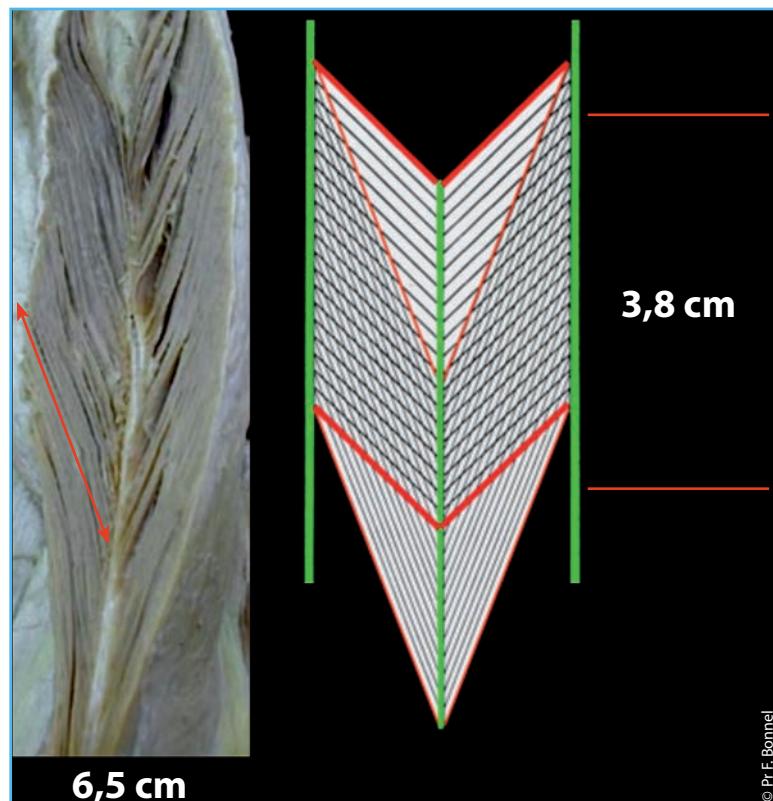
L'angle de pennation mesuré par ultrason sur le muscle extenseur commun des doigts était de 6,5° pour les hommes et de 5,5° pour les femmes, l'angle de pennation du muscle gastrocnémien médial était plus grand au repos que pour les autres muscles tibial antérieur, gastrocnémien latéral et soléaire.

Les mesures de l'angle de pennation la cheville à 90° était de 34,6° chez l'homme et de 27,3° chez la femme pour le muscle gastrocnémien médial, pour le muscle tibial antérieur de 14,3° chez l'homme et de 12,1° chez la femme, pour le gastrocnémien latéral de 23,7° chez l'homme et de 16,3° chez la femme et pour le soléaire de 40,1° chez l'homme et de 26,3° chez la femme. Il n'existe pas de différence significative entre le côté droit et le côté gauche [19].

La longueur des fascicules était de 7,3 cm pour les hommes, et de 5 cm pour les femmes [30].

Si l'hypertrophie musculaire entraîne une augmentation de l'angle de pennation des fascicules musculaires cet angle sera désavantageux pour le développement de la force.

En revanche, une augmentation de l'angle de pennation avec une plus grande quantité de fascicules musculaires fixés au niveau du tendon aura pour conséquences d'augmenter le volume muscu-



► Figure 6

Exemple de rendement musculaire et le principe du raccourcissement
In: Bonnel F. *Le muscle. Nouveaux concepts*. Sauramps Médical, 2009

laire et par conséquent d'augmenter la puissance (PCSA) [31]. La disposition pennée des fascicules permet ainsi une augmentation de la CSA.

■ Rendement musculaire

L'évaluation du travail des fascicules musculaires montre qu'un fascicule musculaire de 2 cm de long a le même rendement que deux fascicules musculaires situés en parallèle de 1 cm de long chacun [2].

L'organisation essentielle dans l'approche du fonctionnement mécanique et du rendement d'un muscle repose sur la direction des fascicules musculaires et la disposition desaponévroses.

Le raccourcissement des fibres musculaires (fascicules anatomiques) entraîne une augmentation de l'angle de pennation ; ainsi, à titre d'exemple pour des fibres longues de 6,5 cm, la contraction entraîne un raccourcissement de 3,3 cm, mais le raccourcissement global est de 3,8 cm (fig. 6).

Suite et bibliographie dans notre prochain numéro

Kinésithér Scient 2013;542:25-33