
Activation musculaire d'un complexe musculo-tendineux équivalent de 400 fibres inclinées

1 Matériels et Méthodes

1.1 Etude préliminaire

Après avoir validé le comportement actif d'une fibre musculaire, il est intéressant d'étudier le comportement actif d'un MTC équivalent, c'est-à-dire d'un paquet de 400 fibres musculaires inclinées, reliées entre elles par de la MEC. Le nombre de fibre dans ce MTC équivalent correspond au nombre approximatif de fibres présentes dans un MTC construit numériquement (Roux *et al.*, 2016). Ainsi, il est possible d'observer uniquement le rôle de la MEC dans le comportement actif du MTC équivalent (Figure 118).

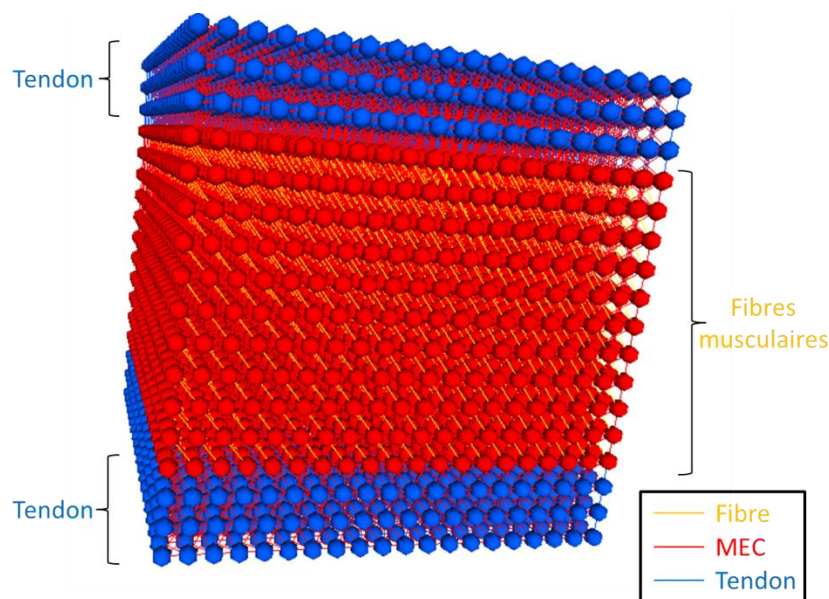


Figure 118 : Modélisation du MTC équivalent comportant 400 fibres musculaires inclinées avec leurs insertions tendineuses

Le comportement actif du MTC équivalent a mis en avant le rôle de la MEC. Une modification de ses propriétés mécaniques en compression a été réalisée pour favoriser la contraction musculaire en réduisant le glissement entre les éléments discrets de fibre musculaire (Figure 119). En effet, les liens de MEC étant dans toutes les directions, lorsque deux éléments discrets d'une même fibre se rapprochent lors de l'activation musculaire, ces liens de MEC autorisent leur rapprochement trop brutal à cause du glissement possible entre les fibres. En augmentant leur raideur en compression, ce phénomène est diminué. Les fibres musculaires peuvent ainsi se contracter sans toutefois se rapprocher trop brutalement l'une de l'autre et engendrer des problèmes numériques. Cependant, d'un point de vue numérique, seule la MEC dans l'axe longitudinal n'est pas modifiée car cette dernière entraîne des problèmes d'ordre de grandeur aberrant pour la force. Effectivement, lors d'essais de traction, certains éléments de MEC se trouvent comprimés, notamment ceux de la MEC dans l'axe de traction. Ceci s'explique par le rapprochement des fibres et leur alignement avec l'axe de traction au cours de la traction. Une raideur trop importante pour ces liens augmenterait très significativement la raideur globale de la structure entière et fausseraient donc les résultats souhaités. Un comportement identique a été observé pour l'épimysium qui, en englobant le MTC, autorise le glissement des éléments discrets des fibres musculaires situées à la périphérie du MTC.

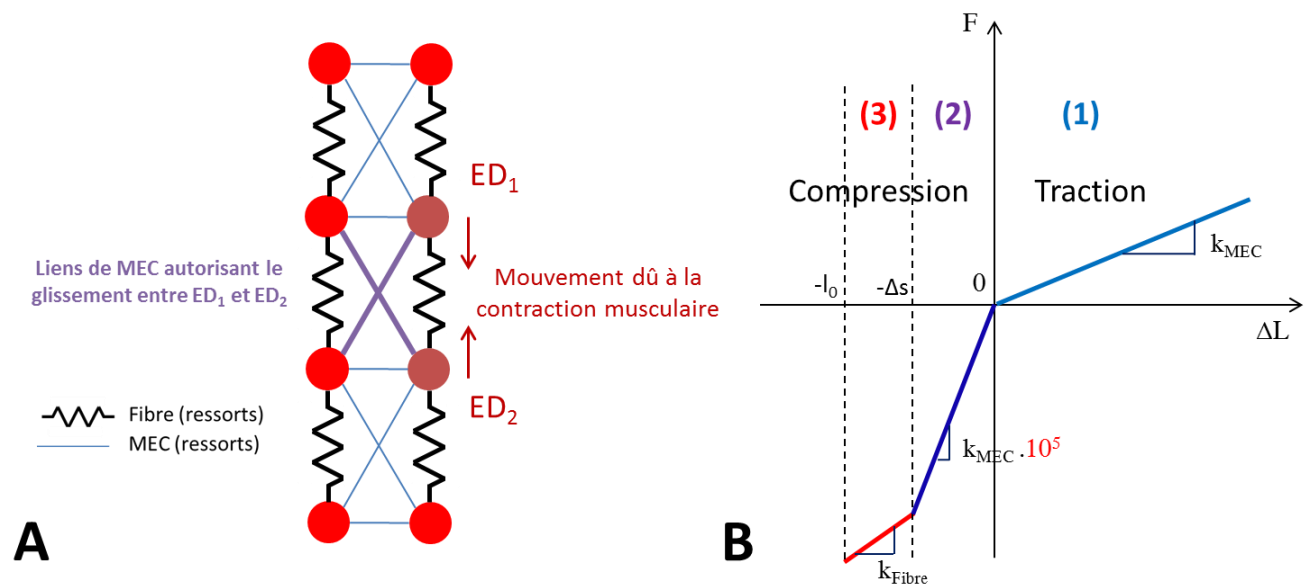


Figure 119 : A. Schématisation des liens de matrice extracellulaire (MEC) entre les fibres musculaires qui autorisent le glissement des éléments discrets lors de la contraction. B. Modification de la relation force/élongation des ressorts de MEC afin de prendre en compte son nouveau comportement en compression et permettre la contraction des fibres musculaires

Sur la Figure 119-B, (1) correspond au comportement en traction de la MEC, (2) correspond au comportement en compression de la MEC, autorisant la contraction des fibres musculaires, et (3) correspond au contact entre deux fibres musculaires modélisé par une raideur égale à celle des fibres (expliqué dans la partie II et dans Roux *et al.*, 2016).

1.2 Evaluation du modèle pour la contraction isométrique

Pour établir une relation entre la force isométrique maximale d'une fibre et celle du MTC équivalent, une étude a été réalisée pour différentes structures, en fixant $F_{\max, \text{ fibre}} = 0,3 \text{ N}$. Un paquet de 400 fibres musculaires, en se contractant, fournit ainsi une force de $400 \times 0,3 = 120 \text{ N}$. Nous nous sommes ensuite intéressés à la force maximale de contraction isométrique fournie par un pavé formé de 400 fibres musculaires alignées. La même simulation a été réalisée sur un pavé formé de 400 fibres musculaires inclinées de 20° de forme parallélépipédique et un de forme cylindrique afin d'évaluer la diminution de la force liée à l'inclinaison des fibres, à la forme de la structure mais surtout d'évaluer l'influence de la MEC dans le comportement en contraction du MTC (Figure 120). Le paramètre de force maximale isométrique (F_{\max}) peut ainsi être ajusté au vu de la valeur escomptée. Une relation peut donc être obtenue entre la force maximale isométrique de chaque fibre musculaire et la force de contraction maximale du MTC équivalent de 400 fibres.

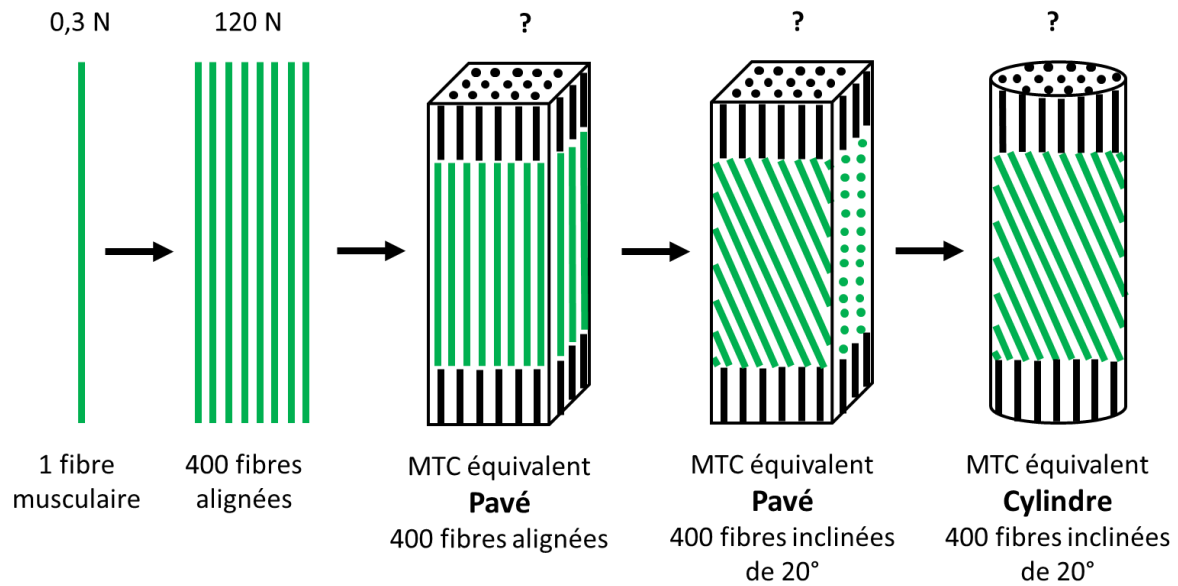


Figure 120 : Méthode d'évaluation de la force isométrique maximale pour différentes architectures. (De gauche à droite) une fibre musculaire ; 400 fibres alignées ; un complexe musculo-tendineux pavé avec 400 fibres alignées ; un complexe musculo-tendineux pavé avec 400 fibres inclinées de 20° ; un complexe musculo-tendineux cylindrique avec 400 fibres inclinées de 20°.

A travers l'étude précédente, une étude sur l'influence de la géométrie est également réalisée pour deux types géométries (parallélépipédique et cylindre), afin d'étudier l'influence de la géométrie du MTC équivalent sur les paramètres de l'activation musculaire et de se rapprocher de la forme du MTC entier étudié.

L'influence de l'angle de pennation sera également étudiée afin d'observer son rôle sur la force maximale de contraction isométrique pour les deux types de géométries (parallélépipédique et cylindre). Cette étude est effectuée sur le MTC équivalent, pour des angles de pennation variant de 0° (fibres dans l'axe longitudinal du MTC équivalent) à 55° (MTC équivalent fortement penné). Pour un angle de pennation donné, et une forme de MTC équivalent choisie (soit parallélépipédique soit cylindrique), une contraction isométrique est effectuée et la force maximale obtenue est notée puis comparée avec celle obtenue pour les autres angles de pennation.

2 Résultats et Discussion

2.1 Etude préliminaire

La réponse active du MTC équivalent de 400 fibres alignées est légèrement plus faible que celle de 400 fibres additionnées. Cependant, cette différence peut en partie être expliquée par la forme parallélépipédique de la structure. Les différences sont également dues au rôle de la MEC qui autorise le glissement des fibres musculaires entre elles. La modification de son comportement en compression a permis de diminuer ce phénomène, tout en conservant le comportement global de la MEC au sein du MTC. L'effet de la MEC lors de la contraction musculaire est connu et a été mis en avant par Sánchez *et al.*, (2014). Dans leur étude sur l'influence de la géométrie du MTC (pavé ou cylindre) lors de simulations numériques 3D de l'activation musculaire, les auteurs justifient la différence de comportement entre les deux formes de MTC par les forces de cisaillement reprises par la MEC. Au cours de l'activation musculaire, la MEC a donc un rôle important concernant le mouvement des fibres contractées.

2.2 Evaluation du modèle pour la contraction isométrique

Pour se rapprocher de la géométrie globale du MTC, le MTC équivalent de forme parallélépipédique a été modifié en un MTC équivalent de forme cylindrique. Une diminution de la force active a été notée lors du changement de forme. Ceci s'explique par les nombreuses fibres, très courtes, situées sur les extrémités du MTC équivalent cylindrique, reliant une partie tendineuse à l'epimysium. L'influence de la géométrie sur le comportement en contraction a également été montrée par Sánchez *et al.* (2014).

Comme nous l'avons vu précédemment, pour une force isométrique maximale d'une fibre fixée à $F_{\max, \text{ fibre}} = 0,3 \text{ N}$, un paquet de 400 fibres musculaires, en se contractant, fournit ainsi une force de $400 \times 0,3 = 120 \text{ N}$. Cependant, un pavé formé de 400 fibres musculaires alignées fournit une force maximale de contraction isométrique de 104,1 N. De même pour un pavé formé de 400 fibres musculaires inclinées de 20° , la force maximale de contraction isométrique vaut 68,8 N. Cette diminution de la force est due à la fois à la structure parallélépipédique, à l'angle de pennation mais surtout à l'influence de la MEC dans le comportement en contraction du MTC. Pour une structure cylindrique, ayant les mêmes dimensions ($\Theta = 20^\circ$), la force maximale de contraction est de 37,3 N, plus faible que précédemment (Tableau 9). Cette diminution supplémentaire est liée à la géométrie de la nouvelle structure et au fait que les fibres musculaires sont plus courtes de par leurs inclinaisons et de par la forme cylindrique de la structure. La relation entre la force isométrique maximale d'une fibre musculaire seule et celle du MTC équivalent avec 400 fibres inclinées implique que la force maximale pour chaque fibre musculaire vaut alors $F_{\max, \text{ fibre}} = 0,3 \text{ N}$. Une telle valeur a été trouvée compte tenu des approximations évoquées précédemment concernant le comportement de la MEC mais également l'influence de la partie tendineuse, de la forme du MTC équivalent et de celle de l'angle de pennation (Winters *et Stark*, 1988, Winter *et Challis*, 2010).

Tableau 9: Valeurs de la force isométrique maximale pour différentes architectures

Architecture étudiée	Force isométrique maximale (N)
1 fibre musculaire	0,3
400 fibres alignées	120
MTC équivalent pavé 400 fibres alignées	104,1
MTC équivalent pavé 400 fibres inclinées de 20°	68,8
MTC équivalent cylindre 400 fibres inclinées de 20°	37,3

L'angle de pennation a également une influence sur la force isométrique maximale générée par le MTC équivalent. En effet, une diminution de la force maximale isométrique est relevée lors de l'augmentation de l'angle de pennation, pour des MTC équivalent de forme parallélépipédique ou cylindrique (Figure 121). L'écart entre les deux courbes est quasiment constant pour des variations d'angle de pennation. Ainsi, le rapport de réduction entre la force maximale isométrique générée par le MTC équivalent de forme parallélépipédique et celui de forme cylindre est de 0,57 en moyenne. Ce rapport diminue légèrement lors de l'augmentation de l'angle de pennation (diminution de 0,65 pour 10 ° vers 0,33 à 55 °). La force projetée suivant l'axe longitudinal du MTC équivalent est plus faible pour des angles de plus en plus grands car plus les fibres sont inclinées, moins leur force générée est orientée suivant l'axe du MTC équivalent. De plus, pour des angles compris entre 10 ° et 55 °, cette relation peut être apparentée à une loi en cosinus, ceci s'expliquant par la relation déjà obtenue entre la PCSA et la $Section_{moy}$ qui sont reliées par le cosinus de l'angle de pennation. Cette relation en cosinus se résume à relier les longueurs suivant l'axe du MTC équivalent à celles suivant l'axe des fibres. Il en est de même pour les efforts, en effet, la force transmise au MTC vaut : $F_{MTC} = F_{Fibre} \cdot \cos(Ang)$. Plus l'angle de pennation augmente (Ang), plus F_{MTC} est faible. Cependant, un changement de pente est observable pour des angles de pennation inférieurs à 10 °. Ceci s'explique par la géométrie du MTC équivalent qui est très différente pour des angles de pennation très faibles car les fibres sont quasi-alignées et les ressorts les constituants sont très longs. Cette différence est également due au rôle de la MEC qui intervient peu lorsque les fibres sont dans l'axe du MTC équivalent mais, lors de l'inclinaison de ces dernières, le rôle de la MEC prend toute son importance et permet la transmission des efforts de contraction à l'intérieur de la structure.

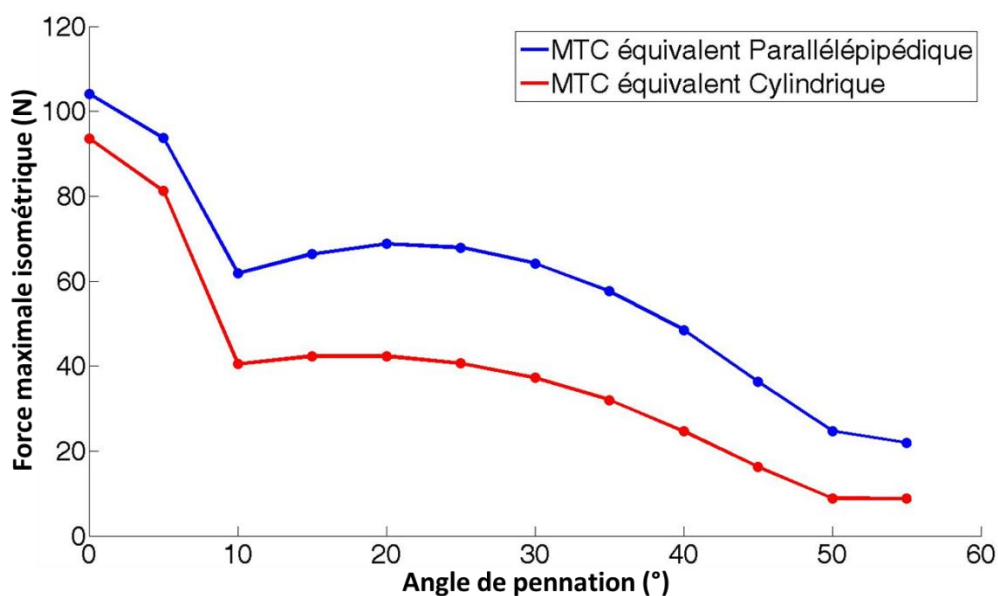


Figure 121 : Evolution de la force isométrique maximale du complexe musculo-tendineux équivalent pour différents angles de pennation, pour une forme parallélépipédique et une forme cylindrique

3 Conclusion

La concentration musculaire, implémentée dans le comportement mécanique des fibres musculaires, a permis une validation du comportement d'un MTC équivalent de 400 fibres inclinées lors d'une contraction isométrique. L'influence de la MEC, de la géométrie et de l'angle de pennation ont été mises en évidence dans cette étude. Une relation entre la force isométrique maximale d'une fibre et celle d'un MTC équivalent a pu être établie, selon l'angle de pennation et la géométrie du MTC équivalent. L'activation musculaire doit donc maintenant être validée sur le MTC complet, en prenant en compte les résultats précédents.

Chapitre 3 : Activation musculaire du complexe musculo-tendineux

1 Matériels et Méthodes

1.1 Influence de la forme du MTC

Dans un but de simplifier la méthode, de diminuer le temps de calcul et de valider uniquement le phénomène d'activation musculaire, les dimensions du MTC sont les dimensions moyennes du MTC étudié dans les parties précédentes (LoM = 134 mm, LoT = 13,4 mm, LaM = 12,1 mm, LaT = 6,7 mm et Ang = 20 °).

La force isométrique maximale pour un MTC est reliée à sa contrainte isométrique qui est identique pour chaque MTC et à sa section physiologique, qui elle doit être personnalisée en fonction de la section moyenne du MTC et de son angle de pennation. La relation les reliant est donnée par Winters *et* Stark (1988) : $F_{max} = PCSA \cdot \sigma_{max}$ avec F_{max} : la force isométrique maximale, PCSA : la section physiologique du MTC et σ_{max} : le pic de contrainte isométrique. Myers *et al.* (1995) montrent que $\sigma_{max} = 0,44$ MPa alors que Winters *et* Stark (1988) trouvent $\sigma_{max} = 0,5$ MPa. Cette dernière valeur est choisie pour la suite de l'étude. Ainsi, pour notre MTC, $PCSA = Section_{moy} \times \cos(20^\circ) = 89,3 \text{ mm}^2$. Donc $F_{max} = 44,6 \text{ N}$. Pour obtenir une force de contraction isométrique de 44,6 N pour le MTC comportant approximativement 400 fibres, la force de contraction à implémenter dans la loi de comportement des fibres musculaires doit être déterminée.

1.2 Séquence d'activation musculaire et courbe force/longueur du MTC

Identiquement à la méthode employée pour les fibres musculaires, la détermination des courbes force/déplacement se fait point par point avec un allongement du MTC puis son maintien en position suivi d'une activation musculaire (Figure 115). Les points des courbes force/déplacement sont donc obtenus pour des sollicitations isométriques, pour différents allongements initiaux du MTC. Une valeur de la force passive (après allongement) et de la force totale (après allongement puis contraction) sont ainsi obtenues. Ainsi, la force totale et la force passive sont obtenues et la force active du MTC en est déduite. Cette méthode a donc été réalisée tous les 1 % de déformation et pour des déformations allant de -30 % à 30 % (compression et traction).

Le comportement passif et actif du MTC est étudié avec les courbes force/longueur pour la partie compression, contraction isométrique (déplacement nul) et traction. La force relevée correspond à la force totale dans le MTC. Le déplacement correspond à l'allongement total du MTC lors des différentes sollicitations décrites précédemment.

1.3 Visualisation de la contraction musculaire

L'aspect visuel du comportement passif et actif du MTC est étudié lors des différentes sollicitations décrites précédemment. Les différentes configurations sont visualisées, notamment la contraction isométrique lors d'un maintien en position du MTC et la visualisation de la déformation visuelle du MTC lors d'un allongement (par exemple un allongement de 10 % de déformation totale) puis d'un maintien en position durant lequel l'activation musculaire est active.

1.4 Variation de l'angle de pennation

La variation de l'angle de pennation est aussi déterminée au cours des différentes sollicitations. La détermination de cette variation d'angle de pennation est identique à celle effectuée dans la Partie I lors d'essais de traction passifs.

1.5 Influence du niveau d'activation (α) et de l'angle de pennation du MTC

L'influence du niveau d'activation sur la force active générée par le MTC est étudiée. Le niveau d'activation pouvant varier entre 0 et 1, nous choisirons les valeurs suivantes : 0,25 ; 0,50 ; 0,75 ; 1. Ceci représentant quatre différents niveaux d'activation allant de faible à maximal. Ce niveau d'activation est le même pour toutes les fibres au vu de l'hypothèse simplificatrice faite que toutes les fibres se contractent en même temps

Les angles de pennation des différents MTC étudiés sont de 10 °, 20 °, 30 ° et 40 °. Ceci afin d'étudier l'influence de l'angle de pennation sur les courbes force/longueur actives et globales des différents MTC.