

Activation musculaire d'une fibre musculaire

1 Matériels et Méthodes

1.1 Relation force/longueur d'une fibre musculaire

La relation force/longueur active d'une fibre musculaire décrit l'évolution de la force en fonction de la longueur de la fibre. Cette relation largement décrite dans la littérature (Gordon *et al.*, 1966, Woittiez *et al.*, 1983, Goubel *et Lensele-Corbeil*, 1998, Winter *et Challis*, 2010, Winters *et al.*, 2011) est, dans notre étude, simplifiée par une parabole centrée en $\Delta l = 0$ (Winter *et Challis*, 2010) (Figure 110).

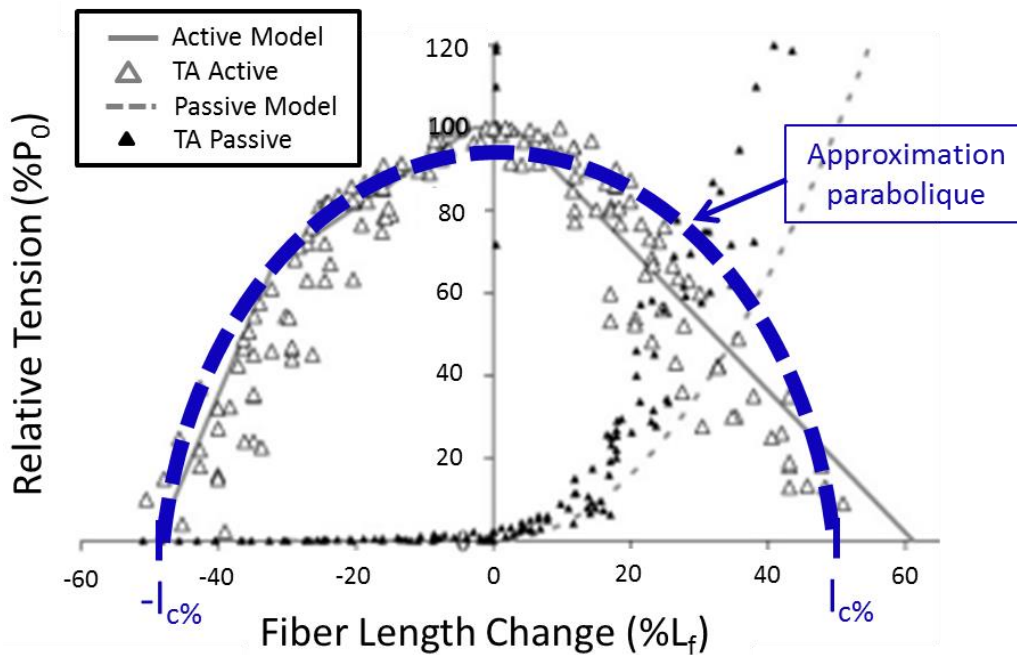


Figure 110 : Représentation simplifiée (courbe en pointillés bleus) de la relation force/longueur sous forme parabolique par rapport à la relation expérimentales pour une fibre musculaire du Tibialis Anterior de lapin (l_c : Pourcentage de longueur caractéristique d'activation) (d'après Winters *et al.*, 2011)

Cette parabole a pour équation :

$$\begin{cases} F = F_{max} \cdot \alpha \cdot \left(1 - \left(\frac{\Delta l}{l_c}\right)^2\right) & \text{si } l_c \geq \Delta l \geq -l_c \\ F = 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (22)$$

Avec, F_{max} : Force isométrique maximale,

α : Pourcentage d'activation musculaire (coefficient de contraction),

Δl : Allongement de la fibre musculaire,

l_c : Longueur caractéristique d'activation ($l_c = 0,56 \times l_0$ avec l_0 : longueur initiale de la fibre musculaire) (Gordon *et al.*, 1966, Winters *et al.*, 2011).

Le coefficient de contraction α peut varier entre 0 et 1. Pour $\alpha = 0$, il n'y a pas de contraction, pour $\alpha = 1$, la contraction est maximale. Ce coefficient de contraction permet de rendre compte du pourcentage de fibres

musculaires sollicitées pour générer la contraction musculaire du MTC (Huijing, 1998) (Figure 111). Nous faisons l'hypothèse dans notre étude que le coefficient α correspond au niveau d'activation du muscle global car dans notre étude toutes les fibres se contractent en même temps lors de l'activation musculaire.

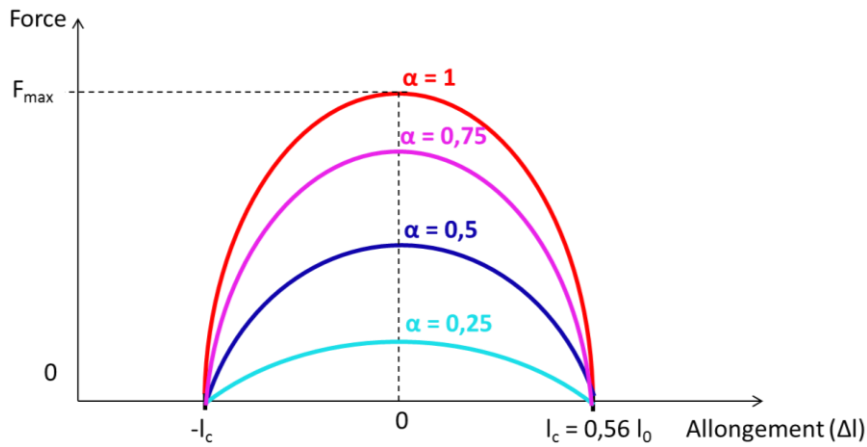


Figure 111 : Représentation simplifiée (parabole) de la relation force/longueur active, pour différents niveaux d'activation (α)

Pour pallier à certains problèmes numériques apparaissant lors de la simulation de la contraction musculaire, le coefficient α varie progressivement au cours de la simulation. En effet, une contraction brutale provoquerait une instabilité dans notre modèle DEM. Une variation progressive de la forme $\alpha = \alpha_{max} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \cos\left[\pi \cdot \frac{t}{\Delta t}\right]\right)$ a été choisie pour diminuer les phénomènes vibratoires, avec $\alpha_{max} = 1$ et Δt : temps de variation du coefficient α (Figure 112). Cette loi de comportement, établie en tant que force, est ajoutée à la force générée dans les ressorts (traction ou compression), lorsque la contraction musculaire est activée pendant la simulation numérique.

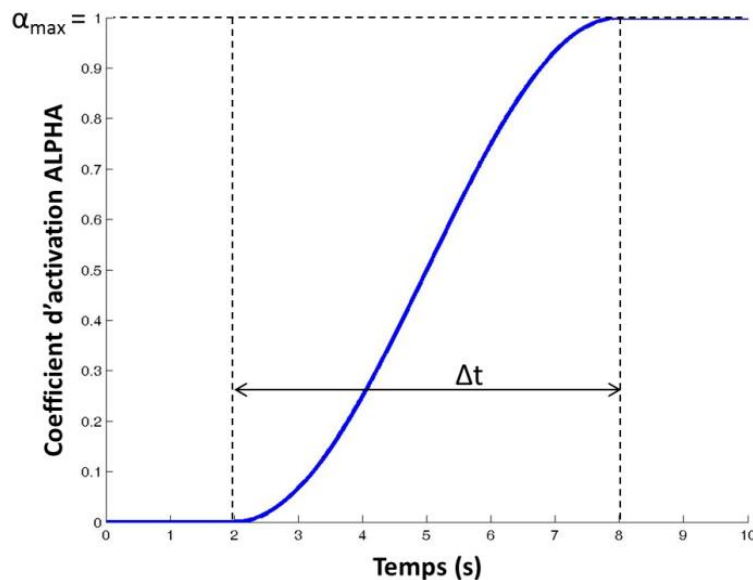


Figure 112 : Représentation temporelle du coefficient de contraction α

1.2 Contraction d'une fibre musculaire

1.2.1 Etude préliminaire

Avant de se focaliser sur le comportement actif du MTC, il est intéressant de modéliser puis valider le comportement actif d'une fibre musculaire. Pour cela, la loi de contraction, précédemment expliquée, a été implémentée dans le comportement mécanique de la fibre musculaire.

Des tests de contraction sont effectués sur la fibre musculaire. Pour cela, la fibre musculaire est reliée de part et d'autre par une fibre de tendon. Cela permet de se rapprocher des conditions physiologiques. L'extrémité inférieure du tendon est fixée et la zone tendineuse supérieure est soumise à une sollicitation expliquée par la suite (Figure 113).

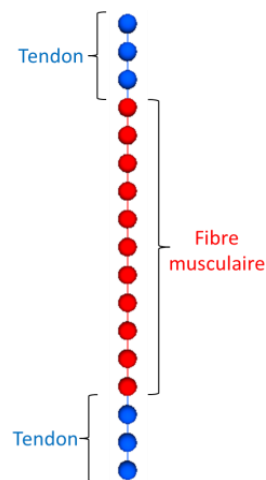


Figure 113 : Modélisation d'une fibre musculaire avec ses insertions tendineuses

Au vu des premiers résultats obtenus, il est apparu que le comportement en compression de la fibre musculaire n'était pas représentatif de son comportement réel. En effet, si l'on souhaite comprimer une fibre musculaire, cette dernière n'ayant pas de raideur en compression, se relâche complètement. Or, le modèle de comportement pour les fibres musculaires leur imposait une raideur en compression identique à celle en traction (Figure 114-A). Afin de prendre en compte l'absence de raideur en compression, la loi des ressorts constituant les fibres musculaires a été modifiée. Une raideur 1000 fois inférieure à la raideur de traction a été implémentée dans le code de calcul (Figure 114-B).

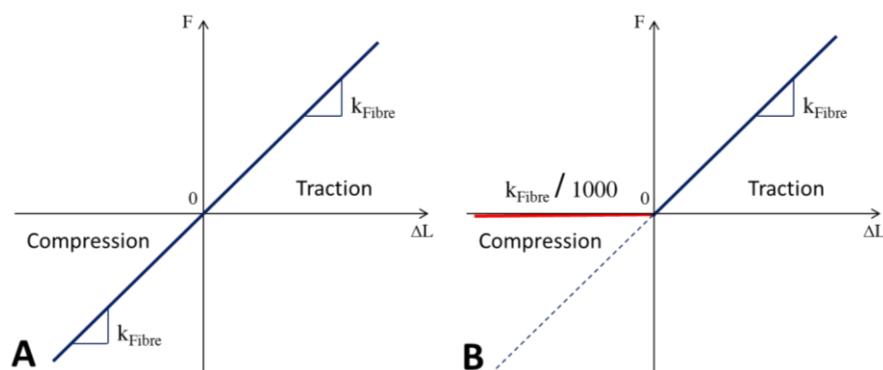


Figure 114 : A. Courbe force/élongation du ressort constituant une fibre musculaire en traction et en compression B. Modification du comportement en compression de la relation force/élongation du ressort constituant la fibre musculaire

1.2.2 Evaluation du modèle d'activation musculaire

La détermination des courbes force/déplacement se fait point par point. Une séquence composée d'un allongement de la fibre puis d'un maintien en position avec activation musculaire est effectuée (Figure 115). Les points des courbes force/déplacement sont donc obtenus pour des sollicitations isométriques, pour différents allongements initiaux de la fibre. Une valeur de la force passive (après allongement) et de la force totale (après allongement puis contraction) sont ainsi obtenues. Il est ensuite simple de déterminer la force active générée par la contraction musculaire ($F_{\text{tot}} = F_{\text{passive}} + F_{\text{active}}$).

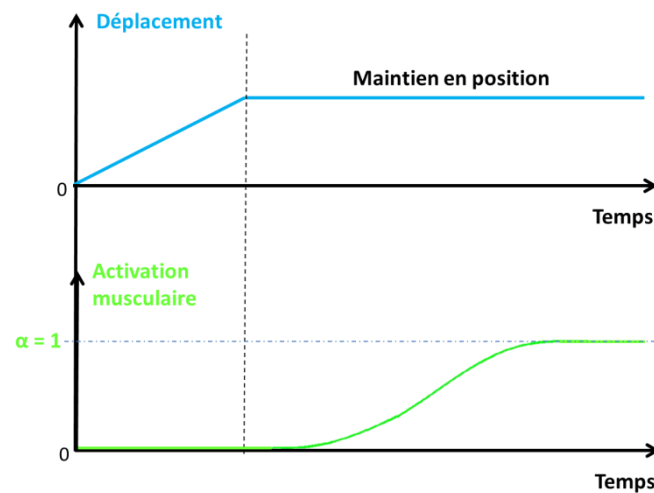


Figure 115 : Séquence composée d'un allongement de la fibre puis d'un maintien en position avec activation musculaire

Le comportement passif, actif et global de la fibre musculaire est observé, de par les courbes force/déplacement mais aussi visuellement, par l'étude et la visualisation du déplacement des éléments discrets de la fibre musculaire au cours des différentes séquences permettant d'obtenir la relation force/longueur de la fibre musculaire.

2 Résultats et Discussion

2.1 Relation force/longueur de la fibre musculaire

L'approximation d'une relation force/longueur de la fibre musculaire de type parabolique nous permet de valider dans un premier temps le modèle de contraction et d'obtenir des premiers résultats sur la faisabilité d'une telle modélisation. Cette modélisation parabolique a déjà été utilisée par d'autres auteurs, pour sa simplicité à mettre en place et son approximation grossière mais correcte de la relation force/longueur active (Winter *et* Challis, 2010). Une étude future pourra porter sur une relation force/longueur plus complexe, peut-être de type gaussienne, centrée en $\Delta l = 0$.

L'allongement de fin de contraction musculaire (longueur caractéristique d'activation l_c) n'est pas le même pour tous les MTCs, cette longueur peut varier de 10 à 60 % de la longueur initiale du MTC selon le type de MTC étudié et sa fonction dans le corps humain (Gordon *et al.*, 1966, Goubel *et* Lenseil-Corbeil, 1998, Buchanan *et al.*, 2004, Winter *et* Challis, 2010, Arnold *et al.*, 2011). Cette valeur est liée à la longueur caractéristique d'activation de la fibre musculaire. Nous avons fait le choix de fixer cette valeur à 56 % au vu des recherches de Gordon *et al.* (1966) et Winter *et* Challis (2010) qui trouvent une longueur caractéristique d'activation de 56 % pour la grenouille (Gordon *et al.*, 1966) ou aux environs de 55 % pour le lapin (Winter *et* Challis, 2010). Cette valeur a été fixée à 56 % car le but de cette étude est de valider dans un premier temps le comportement du MTC lors de la contraction musculaire, de manière qualitative, ce que nous permet la DEM. Suite à cette étude, il pourrait être intéressant de se concentrer sur la valeur exacte de la longueur caractéristique d'activation pour améliorer plus finement le modèle d'activation musculaire.

2.2 Contraction d'une fibre musculaire

2.2.1 Etude préliminaire

La modification de la raideur en compression de la fibre musculaire a permis de rendre compte du phénomène de relâchement de la fibre en compression. Une raideur nulle, pour le comportement en compression de la fibre, n'a pas pu être implémentée dans le code de calcul car cela aurait créé des problèmes numériques de stabilité. Cependant, une raideur 1000 fois plus faible permet d'obtenir une raideur en compression quasi-nulle et significativement négligeable devant la raideur en traction (Figure 114).

2.2.2 Evaluation du modèle d'activation musculaire

La forme et les proportions de la relation force/longueur d'une fibre musculaire avec contraction sont en accord avec la littérature (Goubel *et* Lenseil-Corbeil, 1998, Buchanan *et al.*, 2004, Winter *et* Challis, 2010, Winters *et al.*, 2011). Cette simplification de la relation force/longueur par une parabole centrée en l_0 semble décrire le comportement actif d'une fibre musculaire (Figure 116).

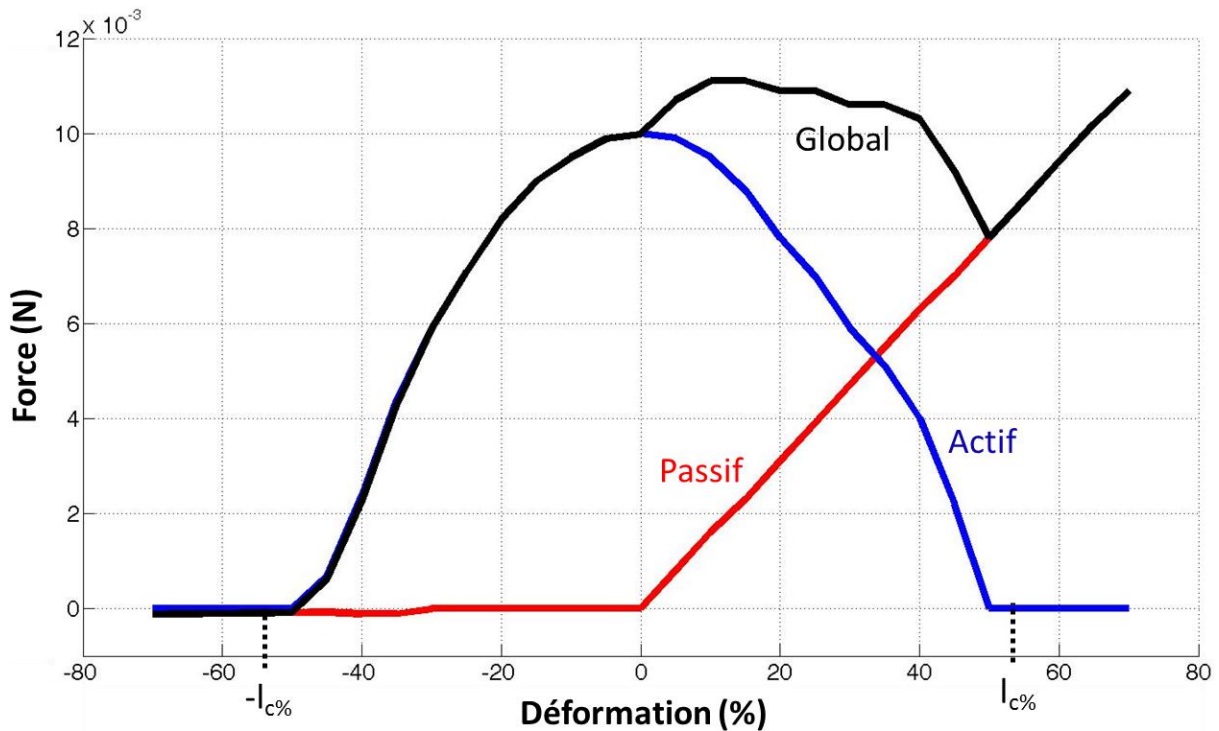


Figure 116 : Représentation du comportement numérique passif, actif et global d'une fibre musculaire

Les faibles différences entre les résultats numériques et théoriques (courbe parabolique) peuvent être dues en partie à la modélisation. Cette différence peut notamment être notée au niveau de la fin de l'activation musculaire qui se produit pour un allongement légèrement inférieur à l_c . En effet, dans notre modèle, une fibre de tendon a été ajoutée à chaque extrémité de la fibre musculaire. Cela fait varier légèrement la raideur de la structure qui comporte deux parties tendineuses, influant ainsi légèrement le comportement global de la structure. Des erreurs de précision sur la déformation expliquent aussi les possibles décalages entre simulation et théorie. La construction de la relation force/déplacement point par point crée une légère erreur lors de l'extrapolation entre les points pour tracer l'ensemble de la courbe force/déplacement. Ce décalage peut s'expliquer à l'aide d'un modèle simple (Figure 117).

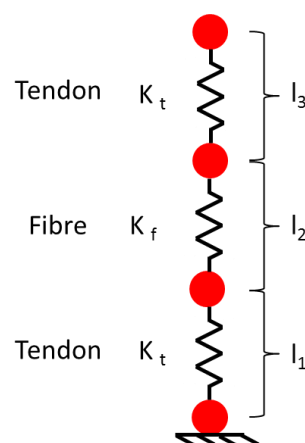


Figure 117 : Schématisation et paramétrage pour le calcul de la force et des déformations pour une fibre musculaire reliée par des tendons

En effet, si l'on considère la structure étudiée comme un ressort de tendon, lié à un ressort de fibre, lié à un ressort de tendon, nous avons les relations suivantes :

$$l_{0,tot} = l_{0,1} + l_{0,2} + l_{0,3} \quad (23)$$

Et

$$l_{tot} = l_1 + l_2 + l_3 \quad (24)$$

D'où

$$\Delta l_{tot} = \Delta l_1 + \Delta l_2 + \Delta l_3 = \Delta l_f + 2 \cdot \Delta l_t \quad (25)$$

Et

$$K_{tot} = \frac{K_t \cdot K_f}{K_t + 2 \cdot K_f} \quad (26)$$

Nous obtenons :

$$F = K_{tot} \cdot \Delta l_{tot} \quad (27)$$

Après simplifications,

$$F = \frac{K_t \cdot K_f}{K_t + 2 \cdot K_f} \Delta l_f + \frac{2 \cdot K_t \cdot K_f}{K_t + 2 \cdot K_f} \Delta l_t \quad (28)$$

En supposant $K_t \gg K_f$, alors $K_{tot} = K_f$

Donc

$$F = K_f \cdot \Delta l_f + 2 \cdot K_t \cdot \Delta l_t \quad (29)$$

L'erreur entre la courbe numérique et la courbe théorique, au niveau de la déformation relevée, est due à l'approximation faite entre K_f et le rapport $\frac{K_t \cdot K_f}{K_t + 2 \cdot K_f}$. Cette approximation est faite lors de la mesure de la déformation de la fibre et de la force relevée.

3 Conclusion

La concentration musculaire a été implémentée dans le comportement mécanique des fibres musculaires. Une validation a été faite pour une fibre musculaire. Certaines hypothèses de travail peuvent être améliorées :

- La relation force/longueur active pourrait être décrite plus précisément à l'aide d'une courbe de type gaussienne par exemple.
- Les différents types de fibres pourraient être pris en compte pour se rapprocher de la physiologie réelle d'un MTC.
- La différence de comportement actif entre les fibres rapides et lentes pourrait aussi être mise en avant (Friden *et* Lieber, 1992, Lieber *et* Friden, 2000, De Souza *et al.*, 2013).

La contraction musculaire au niveau des fibres musculaires a été validée, il est donc possible de l'implémenter dans un MTC équivalent de 400 fibres inclinées afin d'étudier son comportement actif.