
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.

2 Résultats et Discussion

2.1 Influence de la forme du MTC

La formule pour obtenir la force isométrique maximale (Winters *et Stark*, 1988) a permis d'avoir un ordre de grandeur de la force isométrique du MTC et de pouvoir paramétrer ainsi la force isométrique maximale de chaque fibre, grâce à la relation du paragraphe précédent. Ainsi, pour obtenir une force de contraction isométrique maximale égale à 42,6 N, il est nécessaire de fixer la force maximale de contraction des fibres musculaires à $F_{\max, \text{ fibre}} = 0,3 \text{ N}$ (Figure 122). Les résultats précédents sur le MTC équivalent ont permis d'obtenir un bon ordre de grandeur pour la force de contraction de la fibre musculaire ainsi que pour la force maximale isométrique du MTC. Les différences entre les résultats numériques et théoriques s'expliquent également par la prise en compte de l'épimysium qui va contribuer fortement au comportement mécanique global du MTC. Cette enveloppe n'étant pas présente dans la modélisation du MTC équivalent, le comportement actif du MTC s'en trouve légèrement modifié. Le comportement mécanique en compression de l'épimysium a été modifié, de la même manière que cela a été fait pour la MEC. Ces modifications permettent de restreindre le glissement des éléments discrets des fibres musculaires entre eux, lors de la contraction. De plus, la structure du MTC ainsi que sa géométrie rendent la modélisation du MTC plus réaliste mais ce sont des paramètres influents sur le comportement actif du MTC. Cette influence a déjà été expliquée précédemment avec les MTC de différentes formes et démontrée pour le comportement mécanique passif du MTC (Roux *et al.*, 2016).

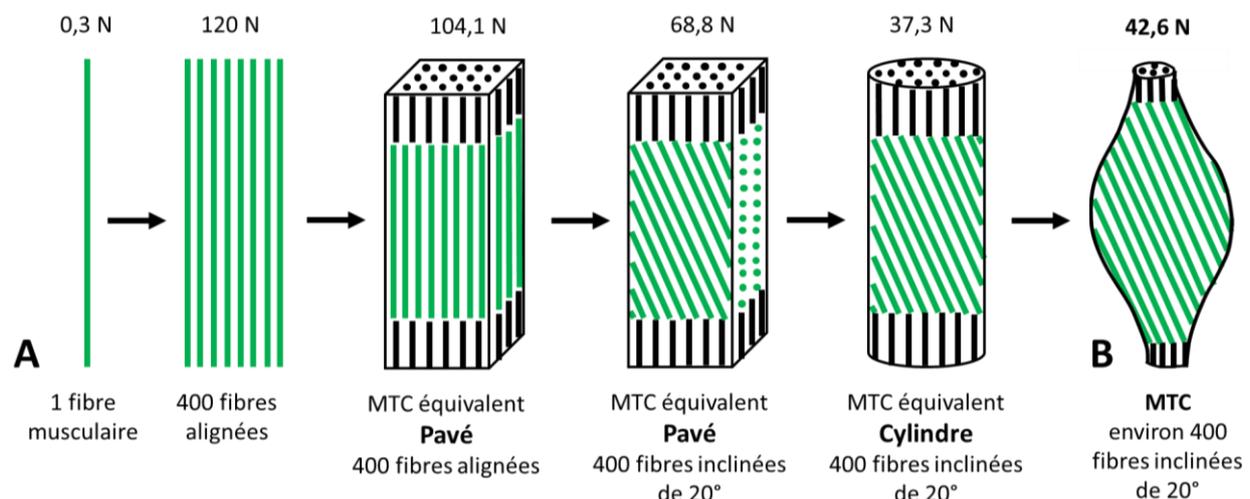


Figure 122 : Détermination de la force isométrique maximale pour différentes architectures.

A. (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°. B. Complexe musculo-tendineux étudié comportant environ 400 fibres inclinées de 20°

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

Le comportement en contraction du MTC est vérifié. Prenons l'exemple d'une contraction à 10 % de déformation totale (Figure 123). La phase (1) correspond à la réponse du MTC pour une traction de 10 % de déformation totale. Il est ainsi possible d'obtenir la force passive développée par le MTC pour atteindre une déformation de 10 %. Le déplacement du MTC est ensuite bloqué lors d'un maintien en position (phase (2))

durant lequel la contraction musculaire est active. La force totale générée par le MTC à la fin de cette sollicitation est obtenue. Cette force correspond à la somme de la force passive et de la force active.

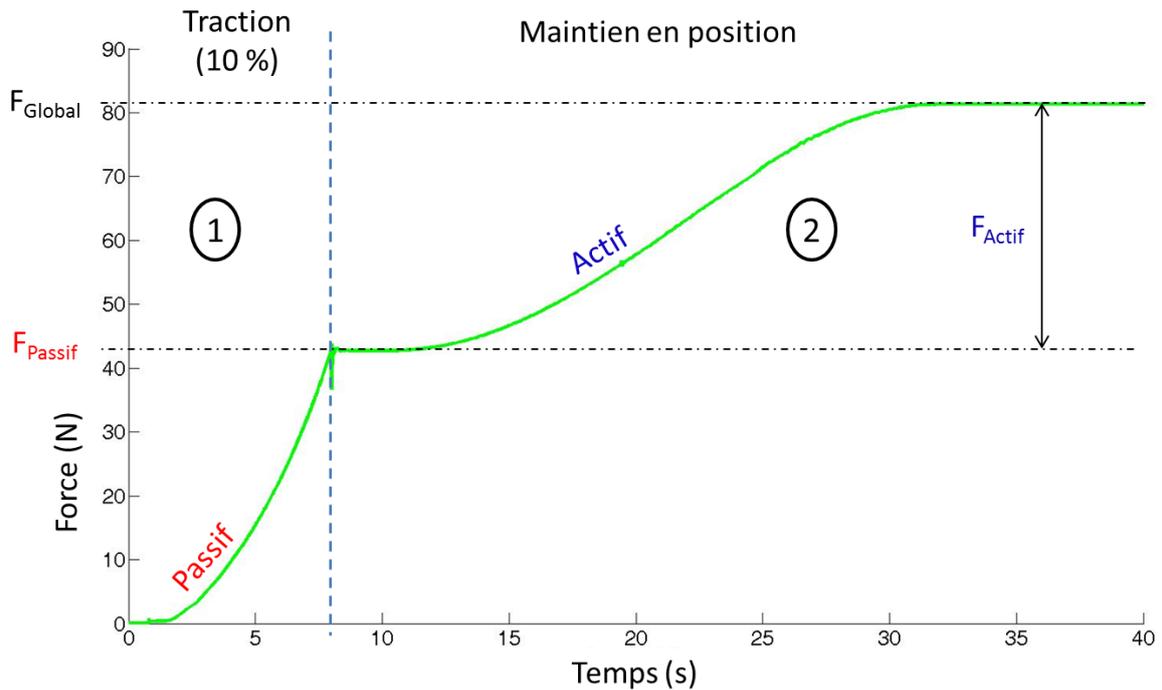


Figure 123 : Représentation de la courbe temporelle de la force du complexe musculo-tendineux pour une déformation de 10 % (1) puis maintien en position lors de la contraction musculaire (2)

La réponse du MTC est en accord avec les données issues de la littérature (Goubel et Lensele-Corbeil, 1998, Buchanan *et al.*, 2004, Arnold *et al.*, 2011) (Figure 124).

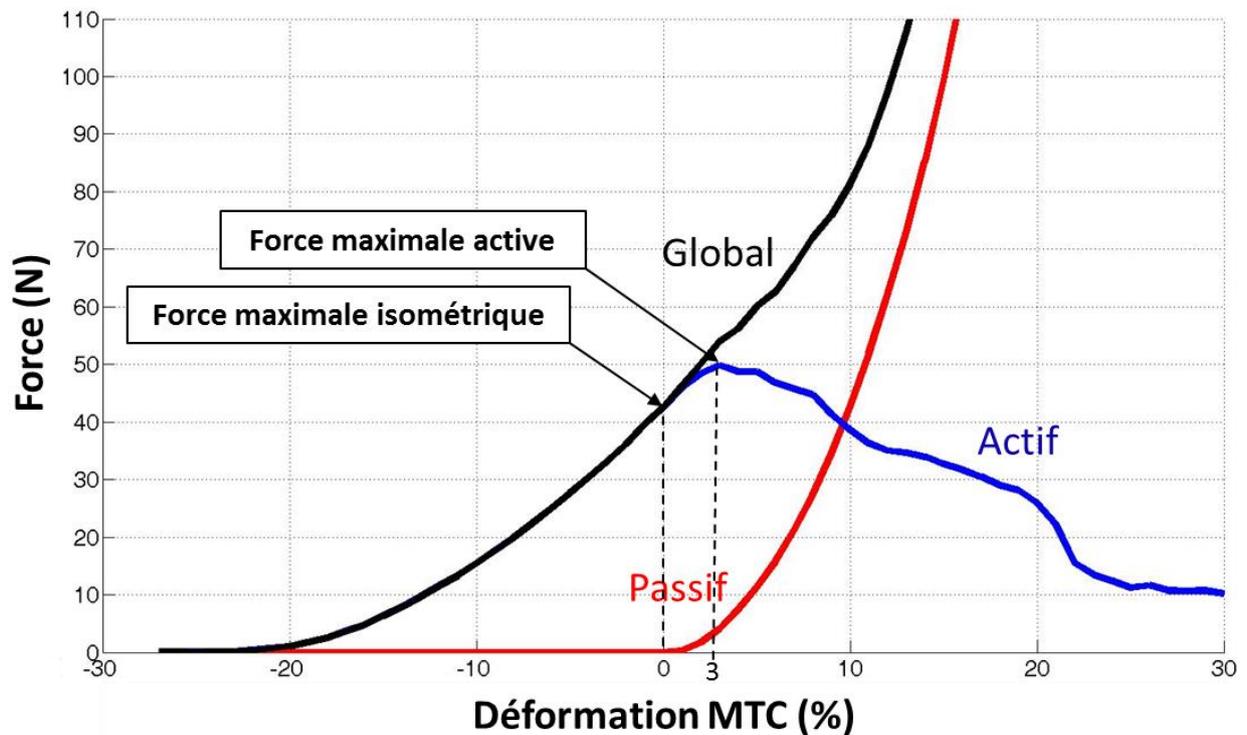


Figure 124 : Représentation du comportement actif, passif et global du complexe musculo-tendineux

Un décalage apparaît entre la force maximale active du MTC et sa force isométrique maximale. En effet, la force maximale active du MTC ne se produit pas pour une déformation nulle mais pour une déformation de 3 %. Cette différence peut s'expliquer par l'angle de pennation du MTC comme l'ont montré Woittiez *et al.*, (1983, 1984) en comparant la relation force/longueur pour deux muscles de rats (un penné et un fusiforme) de typologie similaire (Figure 125). Une grande variabilité des relations force/longueur globales en fonction du type de MTC étudié existe.

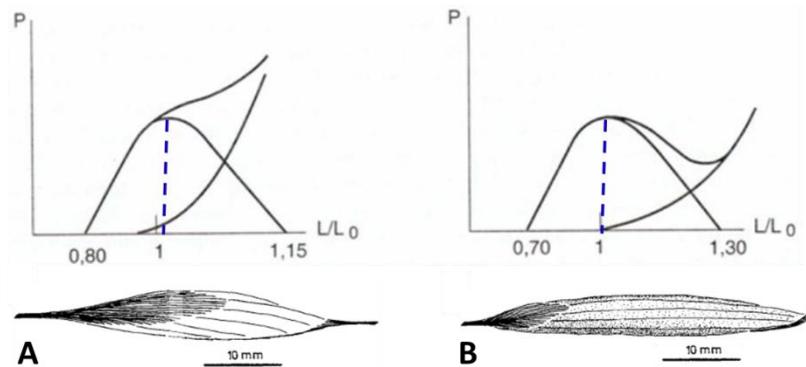


Figure 125 : A. Relation force/longueur pour le gastrocnémien de rat (penné), dont le tissu conjonctif est important et représentation de l'arrangement des fibres dans le MTC. B. Relation force/longueur pour le semi membraneux de rat (fusiforme) et représentation de l'arrangement des fibres dans le MTC (d'après Woittiez *et al.*, 1983)

Dans notre modélisation, toutes les fibres musculaires se contractent en même temps. Anatomiquement, certaines zones de muscle se contractent suivant le pourcentage de contraction souhaité (Kääriäinen *et al.*, 2000, Hedensteirna *et al.*, 2008, Floeter *et al.*, 2010, Hodgson *et al.*, 2012, Turrina *et al.*, 2013). Cette modélisation nous permet de vérifier le bon fonctionnement numérique de l'activation musculaire mais une contraction plus ciblée avec des zones d'activation progressives pourrait être une prochaine piste de recherche.

2.3 Visualisation de la contraction musculaire

La visualisation de l'activation musculaire est vérifiée avec une contraction progressive du MTC (Figure 126-A). Visuellement, pour une contraction après déformation imposée, le MTC s'étire puis, la déformation étant fixée, le MTC se contracte progressivement jusqu'à atteindre sa contraction maximale (Figure 126-B).

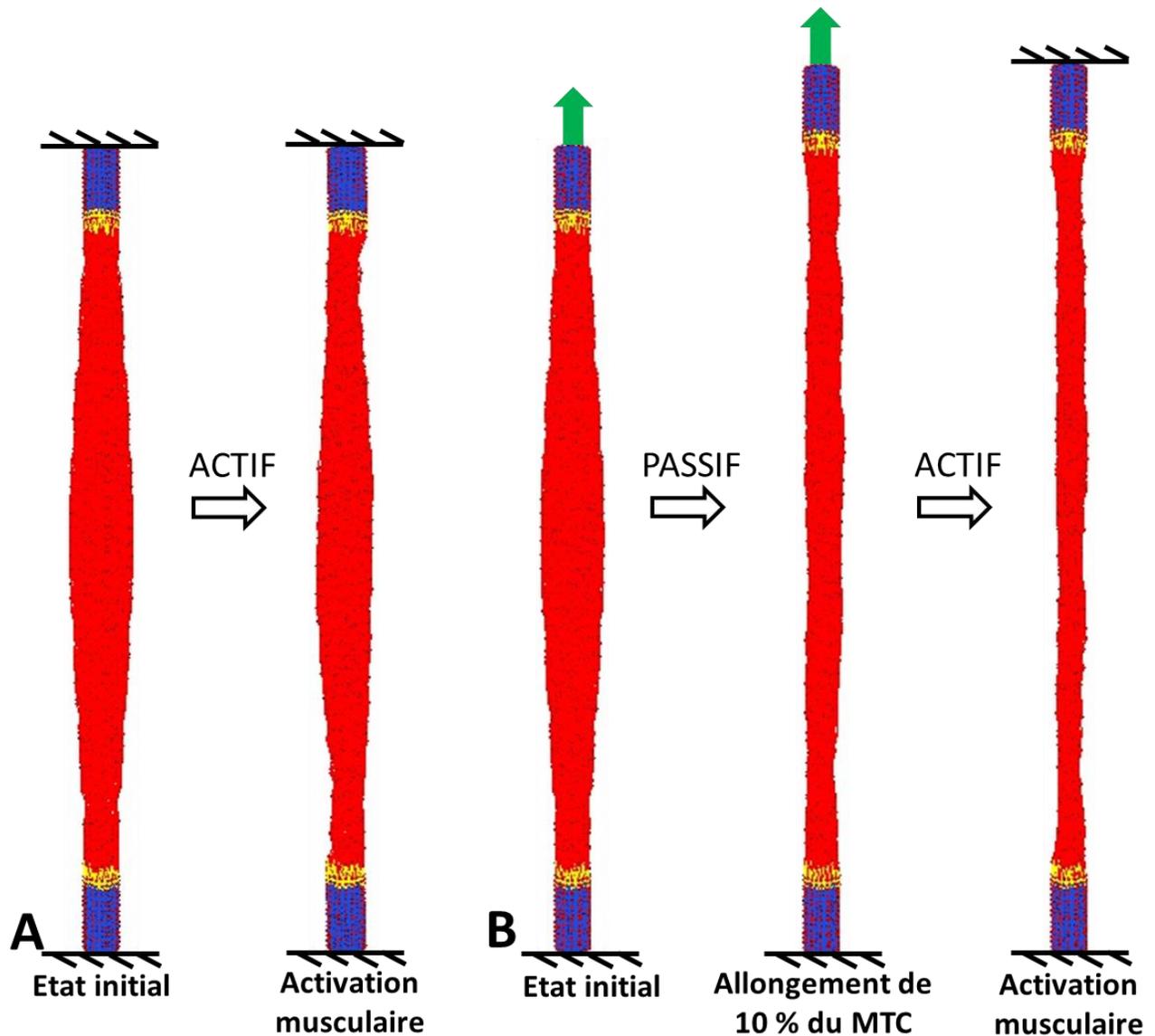


Figure 126 : A. Représentation des différentes étapes pour l'activation musculaire isométrique lors d'un maintien en position. B. Représentation des différentes étapes pour l'activation musculaire pour un allongement donné. De gauche à droite, Etat initial. Allongement passif du complexe musculo-tendineux jusqu'à une déformation globale de 10 %. Maintien en position lorsque la déformation globale a atteint 10 % et comportement actif du complexe musculo-tendineux lors de la contraction des fibres musculaires

2.4 Variation de l'angle de pennation

Numériquement, l'angle de pennation diminue lors de la contraction, isométrique ou excentrique (Figure 127), *a contrario* des nombreuses études *in vivo* présentes dans la littérature (Maganaris *et al.*, 2001, Narici *et al.*, 2003, Abellaneda *et al.*, 2008, Tilp *et al.*, 2011, Simoneau *et al.*, 2012). En effet, lors de l'activation musculaire, les fibres, en se contractant, se raccourcissent. Pour augmenter la force créée par le muscle et transmettre cet effort vers les tendons, les fibres musculaires vont s'orienter et augmenter l'angle de pennation. Cette augmentation de l'angle de pennation est comprise entre 5 et 7 ° (Narici *et al.*, 2003, Tilp *et al.*, 2011). Lors de nos essais d'activation musculaire, la diminution de l'angle de pennation est de l'ordre de 3 °. Cependant, certaines études ont montré que lors d'un étirement actif du MTC, la longueur des fibres augmente et l'angle

de pennation diminue (Finni *et al.*, 2003, Chino *et al.*, 2008, Tilp *et al.*, 2011). Ce résultat montre que lors d'un étirement actif, une compétitivité existe entre la diminution de l'angle de pennation liée à l'étirement du MTC et l'augmentation de l'angle de pennation liée à l'activation musculaire. De futures études veilleront à améliorer la compréhension de la variation de l'angle de pennation en améliorant prioritairement la loi d'activation mais également en créant des zones d'activation dans le MTC.

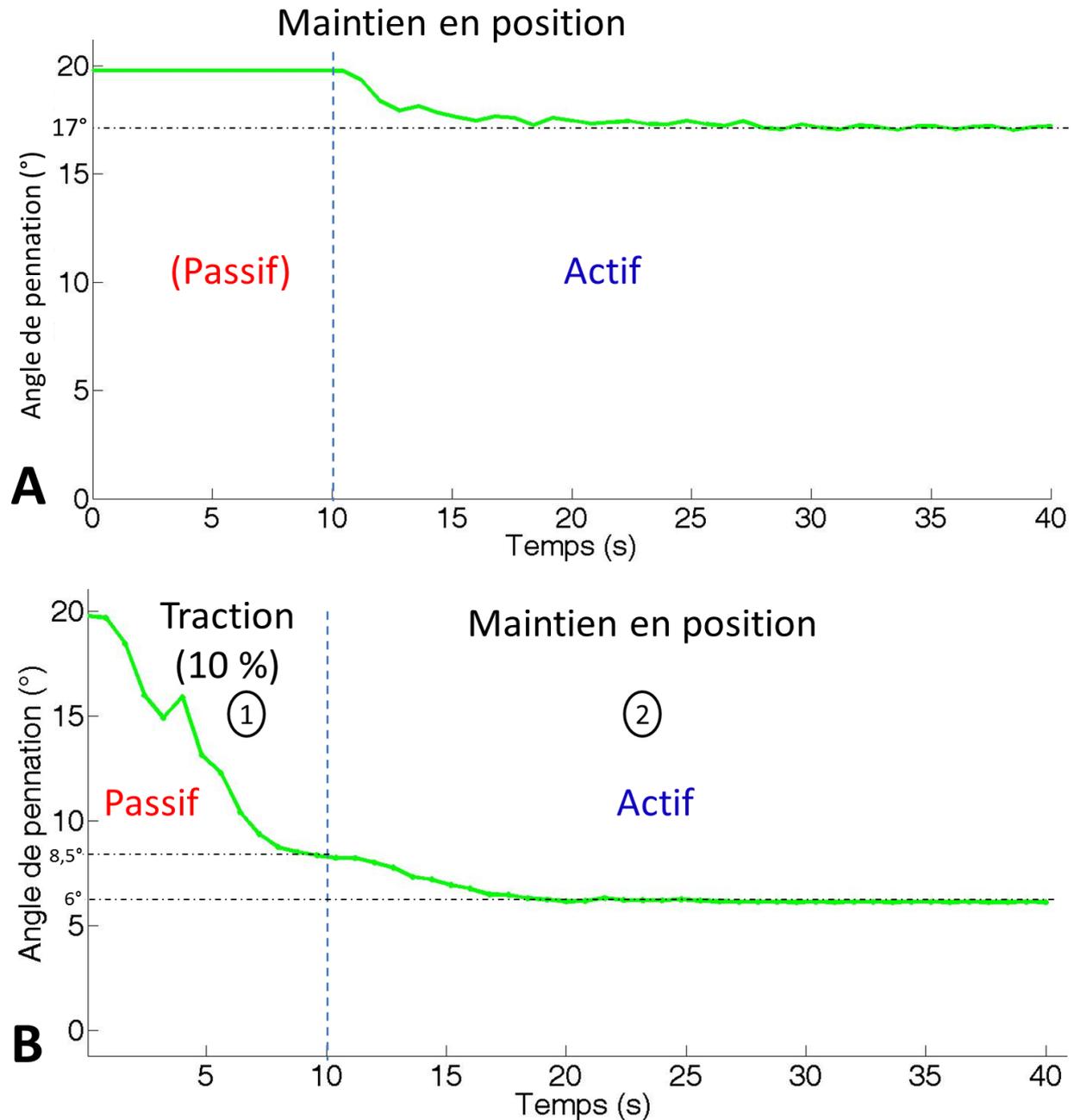


Figure 127 : A. Représentation de la courbe temporelle de l'angle de pennation du complexe musculo-tendineux pour un maintien en position sans déformation lors de la contraction musculaire. B. Représentation de la courbe temporelle de l'angle de pennation du complexe musculo-tendineux pour une déformation de 10 % (1) puis maintien en position lors de la contraction musculaire (2)

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

Le niveau d'activation (α) a une influence sur la force active du MTC. Plus α est proche de 1, plus le sommet de la parabole est élevé (Figure 128). Pour différents niveaux d'activation, l'aspect et l'ordre des courbes est en accord avec les résultats théoriques évoqués dans le début de ce chapitre (Figure 111). Ainsi, en jouant sur le niveau d'activation (lorsque tous les autres paramètres sont fixés), il est possible de d'augmenter ou de diminuer l'activation musculaire du MTC. Cela peut être une alternative à la contraction de l'ensemble des fibres du MTC simultanément et représenterait l'activation musculaire de seulement certains paquets de fibres musculaires.

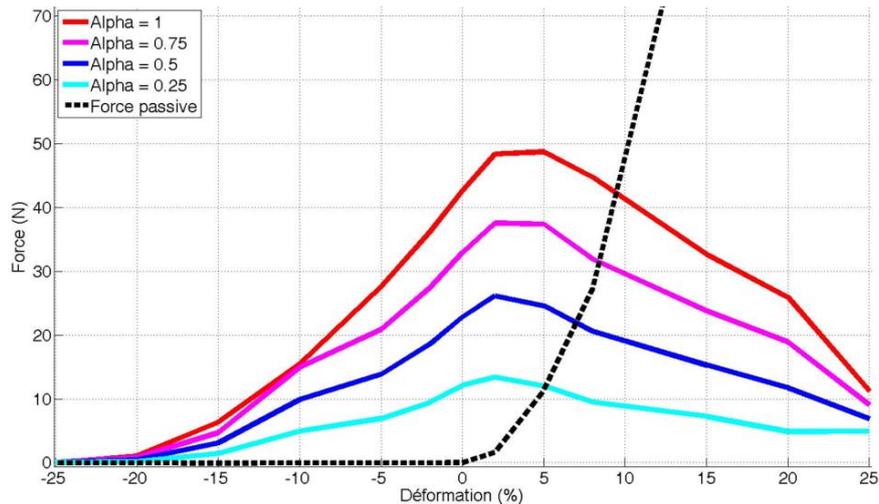


Figure 128 : Représentation de la relation force/longueur active du complexe musculo-tendineux, pour différents niveaux d'activation (α)

L'étude menée pour le même MTC avec différents angles de pennation (10, 20, 30 et 40 °) a montré que les résultats sont conformes à ceux attendus et expliqués précédemment (Woittiez *et al.*, 1983) (Figure 129). Les courbes actives ont globalement le même comportement mais les relations force/longueur globales diffèrent selon l'angle de pennation. En effet, lorsque l'angle de pennation est faible, la relation force/longueur n'est plus strictement monotone. Son comportement actif a une plage d'activité plus réduite, créant un point d'inflexion sur la courbe globale force/longueur (Figure 129-A). L'angle de pennation a effectivement une influence sur la relation force/longueur globale du MTC.

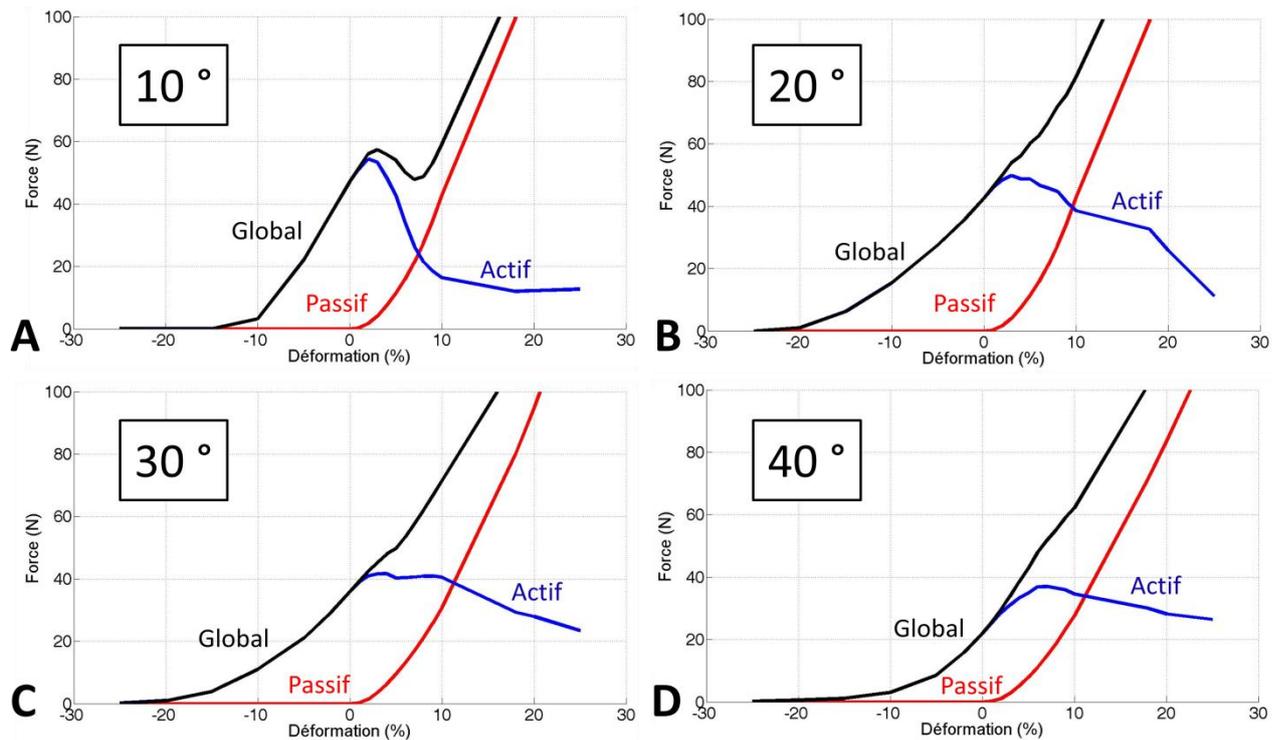


Figure 129 : Relations force/longueur active, passive et globale pour un même complexe musculo-tendineux avec différents angles de pennation. A. Angle de pennation de 10 °. B. Angle de pennation de 20 °. C. Angle de pennation de 30 °. D. Angle de pennation de 40 °

La variabilité des relations force/longueur peut être attribuée à la quantité de tissu conjonctif (Wilkie, 1968), à l'angle de pennation (Woittiez *et al.*, 1983, Gareis *et al.*, 1992, Winters *et Stark*, 1988, Winter *et Challis*, 2010), à la proportion de fibres lentes et à la fonction du MTC étudié (Gareis *et al.*, 1992) (Figure 125). En effet, l'influence de l'aponévrose peut expliquer cette différence entre les deux muscles de rats comme l'ont souligné Huijing *et al.*, (1994). De plus, pour un MTC penné, les fibres sont relativement plus courtes par rapport à la longueur du MTC, en comparaison à un MTC fusiforme. L'effet d'une modification de longueur externe sur la production de force est donc relativement plus marqué pour un muscle à fibres parallèles (Gans *et Bock*, 1965).

3 Conclusion

La contraction musculaire a été implémentée dans le comportement mécanique des fibres musculaires. Une validation a été faite pour une fibre musculaire puis pour un MTC équivalent de 400 fibres inclinées. Le modèle d'activation musculaire a ensuite été validé sur un MTC complet. Ainsi, en modélisant la contraction musculaire au niveau des fibres musculaires, celle-ci a pu être implémentée au niveau du MTC et validée concernant le comportement actif du MTC.

Certaines hypothèses de travail peuvent être améliorées :

- La relation force/longueur active au niveau des fibres musculaires pourrait être améliorée.
- Les différents types de fibres pourraient être pris en compte pour se rapprocher de la physiologie réelle du MTC.
- La variation de l'angle de pennation au cours de la contraction est à approfondir pour être en accord avec les résultats issus de la littérature.
- La contraction musculaire ne s'activant pas simultanément dans toutes les fibres. Créer des zones de fibres s'activant en fonction du taux de contraction musculaire serait une piste d'amélioration du modèle actuel.

Modélisation de la déchirure du complexe musculo-tendineux. Etude de faisabilité



La déchirure du complexe musculo-tendineux est l'une des principales causes de blessure chez les sportifs (Bianchi *et al.*, 1998). Ce traumatisme apparaît lors d'une contraction excentrique (étirement du MTC lors d'une phase de contraction) (Petilon *et al.*, 2005, Bianchi *et al.*, 2006, Chen *et al.*, 2009, Uchiyama *et al.*, 2011). Ce type de blessure provoque une modification des propriétés mécaniques du MTC (Uchiyama *et al.*, 2011). Cependant, les structures impliquées et les mécanismes lésionnels ne sont pas encore clairement identifiés (Brickson *et al.*, 2001, Butterfield *et Herzog*, 2006, Pratt *et al.*, 2012). La connaissance de ces mécanismes lésionnels pourrait aider à prévenir et à améliorer la prise en charge de ces blessures sportives. Cette étude utilise les résultats obtenus dans les précédentes parties afin de modéliser la déchirure du complexe musculo-tendineux lors d'un étirement jusqu'à rupture avec activation musculaire, pour en étudier les mécanismes de ruptures et les structures endommagées.