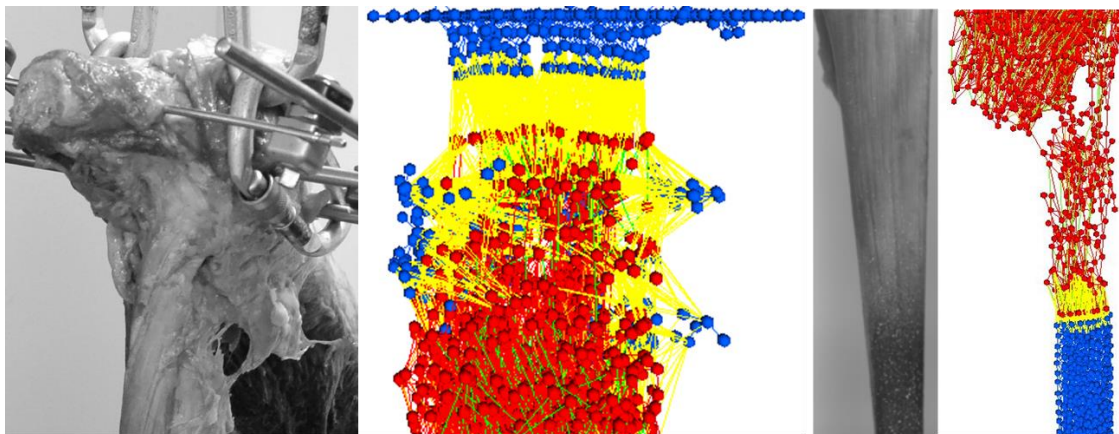

Modélisation de la rupture du complexe musculo-tendineux par la méthode des éléments discrets. Comparaison avec les résultats expérimentaux



Les parties précédentes ont permis de modéliser la réponse passive du MTC en traction et de connaître l'influence des paramètres géométriques sur la réponse mécanique globale. Afin de modéliser la déchirure du MTC lors d'une contraction excentrique, nous commencerons par modéliser la rupture passive du MTC lors d'un test de traction *in vitro*.

Chapitre 1 : Modélisation DEM de la rupture du complexe musculo-tendineux

1 Introduction

La rupture lors d'essais de traction passive sur des tendons et des complexes musculo-tendineux est encore aujourd'hui mal comprise (Morisawa *et al.*, 1997, Brickson *et al.*, 2001, Butterfield *et* Herzog, 2006, Uchiyama *et al.*, 2011, Pratt *et al.*, 2012). La localisation de la rupture est un des axes de recherche encore peu exploré. En effet, de nombreux auteurs localisent la zone de rupture du MTC au niveau de la JMT (Courthaliac *et al.*, 2003, Song *et al.*, 2004, Petilon *et al.*, 2005, Ilaslan *et al.*, 2007) mais d'autres travaux de recherche montrent que la rupture se localise au niveau du corps musculaire (Lin *et al.*, 1999, Kwak *et al.*, 2005), au niveau du corps tendineux (Petilon *et al.*, 2005, Bianchi *et al.*, 2006, Rigglin *et al.*, 2014) ou encore à la jonction entre le tendon et l'os lors d'un arrachement osseux (Lin *et al.*, 1999, Schatzmann *et al.*, 1998).

La finalité de ce chapitre est de modéliser la rupture du MTC en DEM, lors d'un essai de traction passif jusqu'à la rupture. Nous prêterons attention à la localisation de la rupture, au type de rupture mis en jeu et aux composants du MTC impliqués dans cette rupture. La rupture est d'abord réalisée sur le modèle du MTC précédemment réalisé (Roux *et al.*, 2016). Après validation de la modélisation de la rupture (mécanismes de rupture, structures impliquées, localisation) avec des essais expérimentaux, le modèle précédent sera amélioré.

2 Matériels et Méthodes

Le modèle DEM du MTC construit précédemment et validé lors de tests de traction passive est utilisé pour modéliser la rupture lors d'un essai de traction passive. Les conditions limites sont analogues à celles de la sollicitation de traction passive. La base inférieure du MTC est encastrée et l'extrémité supérieure est soumise à un déplacement linéaire. La vitesse de traction (2 mm/s), appliquée au MTC modélisé, est identique à celle des essais expérimentaux.

Afin de simplifier la méthode, de diminuer les temps de calcul et de valider uniquement le phénomène de rupture, les dimensions du MTC sont les dimensions moyennes du MTC étudié précédemment (LoM = 134 mm, LoT = 13,4 mm, LaM = 12,1 mm, LaT = 6,7 mm et Ang = 20 °).

Un critère de rupture a été implémenté dans le code de calcul selon le principe suivant : lorsque la déformation d'un ressort est supérieure à une déformation imposée (en rapport avec la littérature), le ressort est alors supprimé. Il s'agit d'un critère très simple de rupture locale (pas de prise en compte du voisinage) et sans endommagement (André *et al.*, 2013). Le choix d'un critère en déformation, par rapport à un critère en contrainte, a été adopté, en considération des nombreuses recherches montrant que la déformation guide la rupture du MTC (McMaster, 1933, Myers *et al.*, 1995, Lin *et al.*, 1999, Butterfield *et al.*, 2006).

La valeur de la déformation maximale à rupture varie selon le constituant du MTC. Le tendon a une déformation à rupture de 7,5 % en moyenne (Wren *et al.*, 2001).

Pour l'épimysium, la déformation est très importante lors de la traction. A l'examen des différentes pré-simulations de rupture effectuées, il apparaît que la déformation de l'épimysium pilote en grande partie la rupture (Figure 84). Une valeur de 30 % pour la déformation maximale à rupture de l'épimysium a été adoptée pour la suite de l'étude.

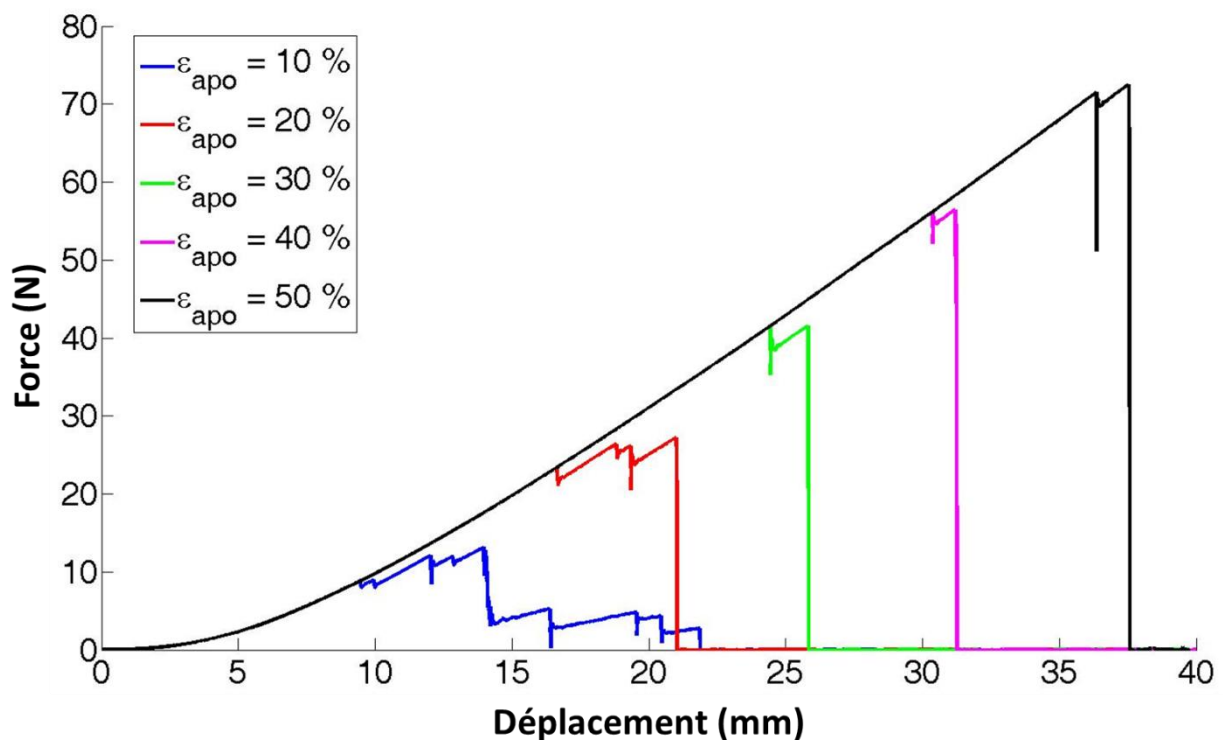


Figure 84 : Influence de la déformation à rupture de l'épimysium sur le comportement global à rupture du MTC

La littérature concernant les études sur la déformation maximale à rupture des fibres est peu abondante (Tidball *et al.*, 1989, Lieber *et al.*, 2003). Seuls Christensen *et al.* (2006) ont noté une déformation à rupture des fibres lentes du muscle *longissimus dorsi* de porc de 53,4 % et une déformation à rupture de 33,8 % pour les fibres rapides. Une déformation maximale de l'ordre de 50 % est donc choisie. Ce choix se justifie par les résultats des études montrant des sarcomères se déformant d'environ 27 % (Lännergren, 1971) à 88 % (Mutungi *et al.*, 2003). Il est alors possible de faire l'hypothèse que les fibres modélisées sont des alignements de sarcomères, justifiant la déformation maximale à rupture de 50 % pour les fibres musculaires.

Les propriétés mécaniques de la MEC sont, à l'instar des chapitres précédents, peu documentées dans la littérature. Ainsi, une étude de sensibilité sur la déformation maximale à rupture de la MEC a été réalisée, en considérant l'influence du critère de rupture sur sa localisation et sur les structures impliquées. Au vu de ces très faibles variations du comportement à rupture du MTC, une déformation de 30 % a ainsi été choisie.

Concernant la JMT, en utilisant le raisonnement qui a prévalu pour la détermination de la valeur son module d'Young, la valeur de sa déformation maximale à rupture correspond à la valeur moyenne calculée du tendon et des fibres musculaires, soit 28,8 %. Une étude a cependant été menée avec des valeurs de déformation à rupture de la JMT égale à celle du tendon ou à celle des fibres musculaires. La valeur de la déformation à rupture de la JMT a une très faible influence sur les résultats de rupture numériques ; seule une différence est observée à la fin de la délamination, lorsque la section de la JMT se réduit nettement.

Le Tableau 8 regroupe les valeurs des déformations à rupture des différents constituants du MTC.

Tableau 8 : Déformation à rupture des différents composants du complexe musculo-tendineux

Composant du MTC	Déformation maximale à rupture (%)	Référence
Fibre musculaire	50	Christensen <i>et al.</i> , 2006
Fibre du tendon	7,5	Wren <i>et al.</i> , 2001
Epimysium	30	-
Matrice extracellulaire	30	-
Jonction myo-tendineuse	28,8	-

La méthode de calcul du modèle numérique a été améliorée dans le cas de la rupture d'une fibre musculaire. En effet, lors de cette rupture, la MEC se trouvant à proximité, ne permet pas le maintien de la tension, du fait de son caractère visqueux. Pour modéliser ce phénomène, lorsqu'une fibre musculaire est rompue numériquement, les éléments de la MEC se trouvant à proximité de cette fibre, sont également rompus et supprimés du calcul. La Figure 85 schématise ce processus de rupture.

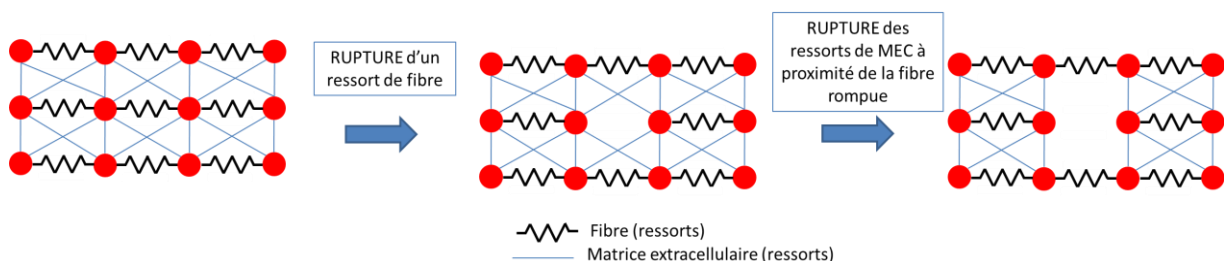


Figure 85 : Schématisation du processus numérique de la rupture d'une fibre musculaire avec rupture des liens de matrice extracellulaire à proximité

Les relations force/déplacement sont obtenues au cours de la simulation numérique, elles sont comparées aux résultats expérimentaux.

Les contraintes peuvent être affichées pour chaque élément discret. L'objectif est donc de connaître et cartographier les contraintes dans chaque élément discret. En repérant les zones de concentration de contrainte, il est également possible de déterminer quelles sont les zones les plus susceptibles de se rompre lors d'un essai de traction. En s'inspirant des travaux d'André *et al.* (2013), le tenseur des contraintes est calculé par la formule suivante :

$$\bar{\sigma}_i = \frac{1}{2\Omega_i} \left(\frac{1}{2} \sum_{j \neq i} \vec{r}_{ij} \otimes \vec{f}_{ij} + \vec{f}_{ij} \otimes \vec{r}_{ij} \right) \quad (17)$$

Avec $\otimes$: produit tensoriel entre 2 vecteurs,

Ω_i : volume de l'élément discret i,

$\bar{\sigma}_i$: tenseur des contraintes de Cauchy équivalent de l'élément discret i,

$\vec{f}_{ij}$: force exercée sur l'élément discret i par le ressort qui relie l'élément discret i et un autre élément discret j,

$\vec{r}_{ij}$: position relative (vecteur) entre le centre des deux éléments discrets reliés i et j.

Enfin, le nombre de liens ressorts rompus au cours de la sollicitation est observé en fonction du déplacement. Il est ainsi possible de connaître la répartition et l'appartenance des liens du MTC lors de sa rupture.

3 Résultats et Discussion

Les contraintes dans chaque élément discret ont pu être calculées lors de la sollicitation de traction jusqu'à rupture. Il est donc possible de visualiser les contraintes tout au long de l'essai. La cartographie des contraintes a confirmé la présence d'une concentration de contraintes dans la zone myo-tendineuse lors d'un essai de traction passive (Figure 86). Ceci s'explique par la grande raideur des tendons et la souplesse des muscles, ce qui est à l'origine d'un saut de raideur à la transition des deux structures : la JMT.

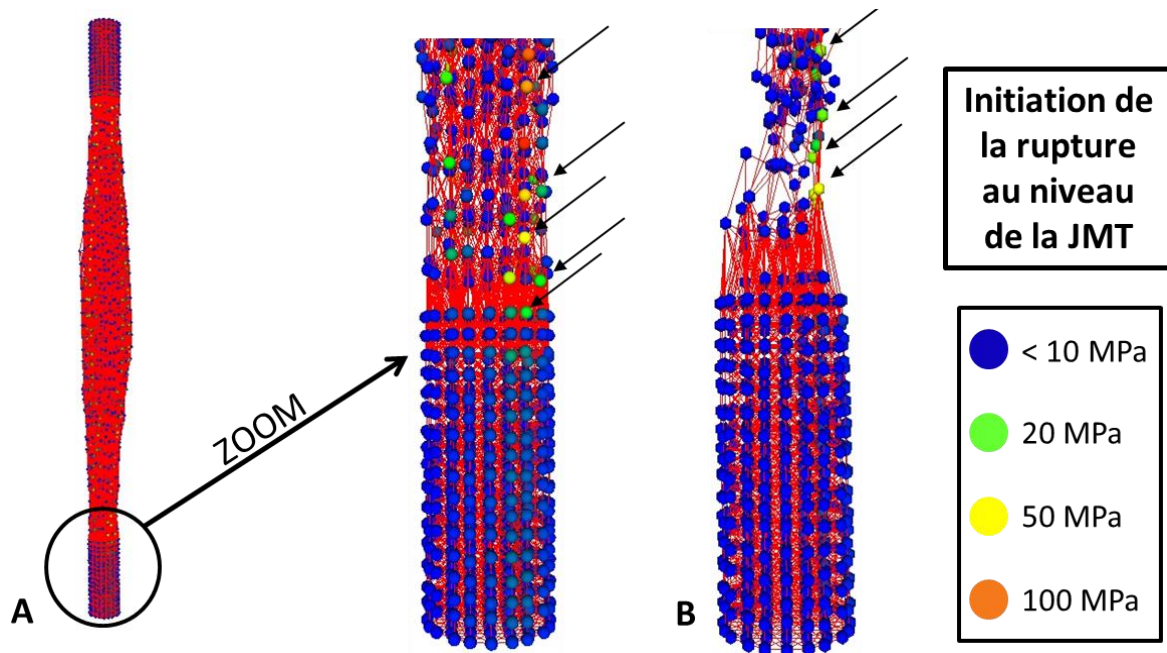


Figure 86 : A. Répartition des contraintes pendant un essai de traction et agrandissement sur la jonction myo-tendineuse. B. Répartition des contraintes au niveau de la jonction myo-tendineuse avec initiation de la rupture (les flèches noires indiquent les concentrations de contraintes)

L'étude des liens ressorts cassés lors d'un essai de traction à rupture montre que la rupture a lieu au niveau des fibres musculaires, proches de la JMT et par conséquent, également au niveau de la MEC (selon le processus de rupture implémenté dans le code de calcul et décrit précédemment) (Figure 87).

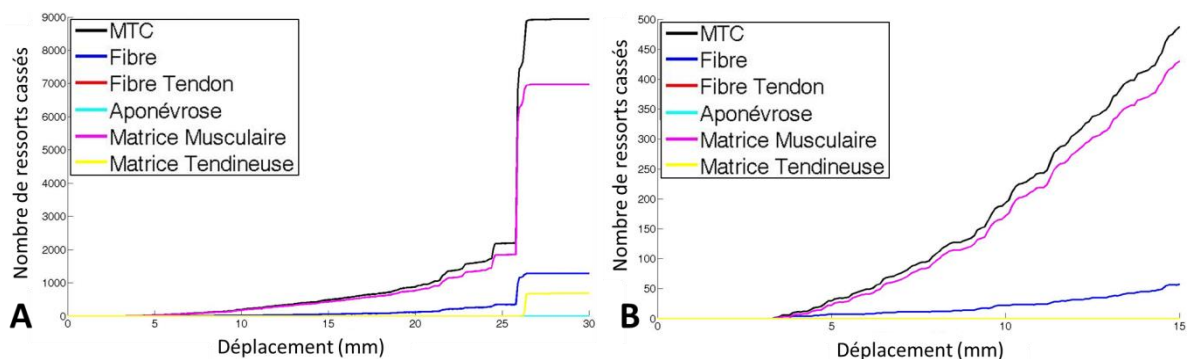


Figure 87 : A. Visualisation du nombre de ressorts rompus en fonction du déplacement. B. Agrandissement au niveau des premiers ressorts rompus

Les premiers ressorts à se rompre sont ceux des fibres puis ceux des liens de MEC. Ceci correspond, au niveau macroscopique, à une délamination des fibres musculaires au niveau de la JMT, et ce, jusqu'à rupture.

L'aspect des courbes force/déplacement est caractéristique d'un essai de traction jusqu'à rupture (Figure 88). Ceci peut être mis en relation avec les essais à rupture du SCM décrit dans la thèse de L-L. Gras (2011) (Figure 43).

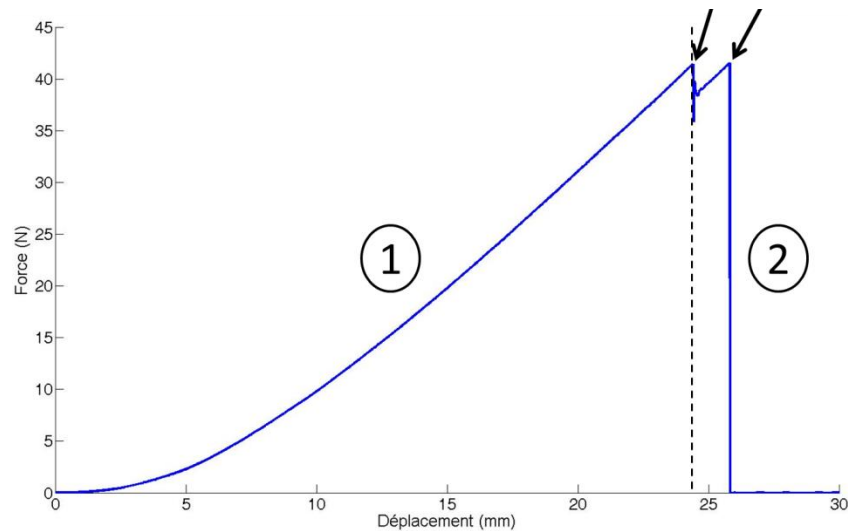


Figure 88 : Courbe force/déplacement pour un essai de traction à rupture. Les flèches correspondent aux ruptures de paquets de fibres jusqu'à la délamination totale du complexe musculo-tendineux

La partie (1) de la courbe (Figure 88) met en exergue l'aspect non-linéaire hyper-élastique qui a déjà été validé précédemment (Roux *et al.*, 2016). La partie (2) de la courbe (Figure 88) représente la rupture avec différents pics qui correspondent à la délamination des fibres musculaires au niveau de la JMT (Figure 89).

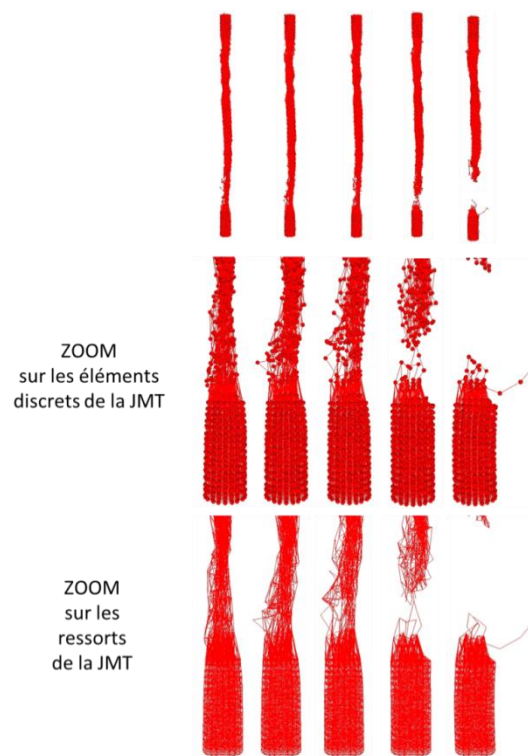


Figure 89 : Rupture du complexe musculo-tendineux au niveau de la jonction myo-tendineuse avec agrandissement sur les éléments discrets et agrandissement sur les ressorts