

Titre: Développement de muscles artificiels spiralés à base de filaments
Title: composites Kevlar/Polyuréthane thermoplastique pultrudés

Auteur: Philippe St-Gelais
Author:

Date: 2026

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: St-Gelais, P. (2026). Développement de muscles artificiels spiralés à base de
Citation: filaments composites Kevlar/Polyuréthane thermoplastique pultrudés [Master's
thesis, Polytechnique Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/76889/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/76889/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Louis Laberge Lebel
Advisors:

Programme: Génie mécanique
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

**Développement de muscles artificiels spiralés à base de filaments composites
Kevlar/Polyuréthane thermoplastique pultrudés**

PHILIPPE ST-GELAIS

Département de génie mécanique

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

Génie mécanique

Mai 2026

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

**Développement de muscles artificiels spiralés à base de filaments composites
Kevlar/ Polyuréthane thermoplastique pultrudés**

présenté par **Philippe ST-GELAIS**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Daniel THERRIAULT, président

Louis LABERGE LEBEL, membre et directeur de recherche

Sampada BODKHE, membre

REMERCIEMENTS

Je tiens avant tout à exprimer ma profonde gratitude à mon superviseur et mentor, Professeur Louis Laberge Lebel. Sa positivité, sa grande disponibilité et ses conseils m'ont permis de progresser tout au long de ce projet. Je le remercie pour sa confiance et pour l'opportunité de recherche qu'il m'a offerte.

Je souhaite également remercier chaleureusement Maissaloun El-Jakl, Sara Da Costa Pessoa et Romain Martin. Leur accompagnement a été primordial pour l'avancement de mes travaux et mon développement en tant que chercheur.

Je tiens également à remercier l'ensemble du personnel de Polytechnique Montréal, en particulier les techniciens Christian-Charles Martel, Vincent Mayer et Mario Grenier pour leur soutien technique lors de mes travaux.

Enfin, merci à mes collègues de bureau, Erwan Hamon, Clara Grandisson Arsenault, Brandon Turcotte, Anne-Sophie Spiridonakis-Batista, Jérémie Boulet Bergeron et Evans Frandsen, pour la bonne ambiance et l'entraide au quotidien. Grâce à vous, ce parcours a été bien plus agréable.

Merci à ma famille et mes amis pour votre soutien tout au long de ce projet et de ces mille et une aventures.

RÉSUMÉ

L'étude menée a pour objectif le développement de muscles artificiels spiralés à base de filament Kevlar/Thermoplastique polyuréthane (TPU) produit par pultrusion thermoplastique. Afin d'accomplir cet objectif, quatre axes de recherches ont été établis.

Le premier axe est le développement du procédé de fabrication de filament composite Kevlar/TPU de 1mm de diamètre. L'équipement nécessaire pour faire usage de la pultrusion thermoplastique à filières multiples et filière de refroidissement par tube à paroi mince a été développé. La matière première de pultrusion vient de fils de Kevlar et de TPU réunis par assemblage par torsion. Plusieurs configurations de filaments, dont l'angle de torsion varie entre 5°, 10°, 15° et 20°, ont été produites avec un diamètre de 1mm.

Le deuxième axe est la mise en forme des filaments tordus de polymère renforcé en muscle artificiel spiralé. La formation des spires est accomplie par la méthode d'insertion de spires par torsion (IST). Cette méthode consiste à tordre le filament sous tension jusqu'à la formation de spires spontanées une fois le point d'instabilité du filament atteint. La formation de nodules sphériques le long du filament est observée durant la torsion. Ces nodules sont composés de replis des fibres internes du filament. Les muscles spiralés finaux possèdent en moyenne $5,6 \pm 0,3$ spires par centimètres et un indice de ressort inférieur à 1. La forme finale des muscles produits par IST est figée par une stabilisation thermique à 100°C. Les muscles stabilisés peuvent être stockés au repos sans réduction de leur torsion ou la perte de spires.

Le troisième axe est l'activation thermique des muscles spiralés. La plage de température d'opération des muscles est de 25°C à 105°C. Une masse de 400g est fixée aux muscles lors de leur activation thermique, les configurations de 5°, 10°, 15° et 20° produisent des activations de $3,5\% \pm 0,6\%$, $4,3\% \pm 0,3\%$, $6,1\% \pm 0,9\%$ et $5,1\% \pm 0,5\%$ respectivement. L'activation des muscles est hautement linéaire sur toute la plage de température, excepté pour le muscle de 20° dont la courbe d'activation s'affaiblit au-delà de 60°C. L'activation du muscle de 15° a été testée avec des masses allant de 400g à 1000g. L'augmentation de la masse cause l'étirement graduel du muscle, mais elle ne semble pas affecter son pourcentage d'activation. Les muscles de polymère renforcé existants utilisant les fibres de carbone et silicone Polydiméthylsiloxane soulèvent une masse de 1890g avec une contraction de 25%. Les muscles Kevlar/TPU produits soulèvent une masse de 1000g avec une contraction de 6,3%.

Le quatrième axe est la création d'un modèle cinématique de l'activation des muscles artificiels spiralés. Le modèle cinématique est intégré à un environnement de design permettant l'itération rapide de différentes configurations géométriques et matérielles du muscle. Le modèle ne nécessite que la mesure des dimensions du muscle étudié et un seul test de caractérisation. L'expansion thermique radiale du filament à muscle sur la plage de température d'opération est étudiée à l'aide d'une chambre thermique équipée d'un système de mesure par corrélation d'images numériques (CIN). L'expansion thermique radiale du muscle entre 22°C et 110°C est de 2,08%. L'expansion thermique est linéaire entre 22°C et 100°C et plafonne au-delà. Une fois les valeurs dimensionnelles et d'expansion thermique du muscle entrées dans le modèle, ce dernier anticipe une activation de 6,45% sur la plage d'opération, compare à l'activation expérimentale de $5,94 \pm 0.3\%$. Des travaux supplémentaires sur l'analyse thermique sont nécessaires afin d'améliorer la précision de la modélisation qui possède présentement une erreur de 20% sur la pente de l'activation. L'environnement de design est cependant un outil bénéfique pour orienter les nouvelles configurations géométriques et matérielles des muscles.

Les travaux réalisés dans cette étude ont servi à la progression de la démocratisation des muscles artificiels par le développement d'une méthode de production à grande échelle de muscles artificiels de polymères renforcés à faibles coûts.

ABSTRACT

This study aims to develop twisted artificial muscles made from Kevlar and thermoplastic polyurethane (TPU) filament produced by thermoplastic pultrusion. In order to achieve this objective, four research quadrants have been established.

The first quadrant of research is the development of the manufacturing process for a 1mm diameter Kevlar/TPU composite filament. The equipment necessary to use multi-die thermoplastic pultrusion and a thin-walled tube cooling die has been produced. The raw materials for pultrusion comes from Kevlar and TPU fiber yarns joined by torsion assembly. Several filament configurations, with twist angles varying between 5°, 10°, 15°, and 20°, were produced with a diameter of 1 mm.

The second quadrant of research is the shaping of twisted polymer-reinforced filaments into twisted artificial muscles. The formation of the coils is accomplished by the twist insertion method (TIM). This method involves twisting the filament under tension until spontaneous coil formation occurs once the filament's instability point is reached. During the torsion process, the formation of spherical nodules along the filament is observed. These nodules are comprised of folds in the internal fibers of the filament. The final twisted muscles have an average of 5.6 ± 0.3 coils per centimeter and a spring index of less than one. The final shape of the muscles produced by TIM is fixed by thermal aging at 100°C. The aged muscles can be stored at rest without any reduction in their twist or loss of turns.

The third quadrant of research is the thermal activation of twisted muscles. The operating temperature range of the muscles is 25°C to 105°C. A mass of 400g is attached to the muscles during thermal activation, with configurations of 5°, 10°, 15°, and 20° producing activations of $3.5\% \pm 0.6\%$, $4.3\% \pm 0.3\%$, $6.1\% \pm 0.9\%$, and $5.1\% \pm 0.5\%$ respectively. The activation of the muscles is highly linear across the entire temperature range; except for the 20° muscle whose activation curve weakens beyond 60°C. The activation of the 15° muscle was tested with weights ranging from 400g to 1000g, the maximum that could be installed on the setup. The increase in load causes a gradual stretching of the muscle, but it does not seem to affect its activation percentage. Existing polymer-reinforced muscles using carbon fibers and polydimethylsiloxane (PDMS) can lift a mass of 1890g with a 25% contraction. The Kevlar/TPU muscles produced can lift a mass of 1000g with a 6.3% contraction.

The fourth quadrant of research is the creation of a kinematic model for the activation of twisted artificial muscles. The kinematic model is integrated into a design environment allowing for the rapid iteration of different geometric and material configurations of the muscle. The model only requires the measurement of the dimensions of the muscle studied and a single characterization test. The radial thermal expansion of the muscle filament over the operating temperature range is studied using a thermal chamber equipped with a digital image correlation (DIC) measurement system. The radial thermal expansion of the muscle between 22°C and 110°C is 2.08%. Thermal expansion is linear between 22°C and 100°C and levels off beyond that. Once the dimensional and thermal expansion values of the muscle are entered into the model, it outputs an expected activation of 6.45% over the operating range, compared to the experimental activation of $5.94 \pm 0.3\%$. Additional work on thermal analysis is necessary to improve the accuracy of performance modeling, which currently has a 20% error in the activation slope. However, the design environment is a beneficial tool for guiding the new geometric and material configurations of the muscles.

The work carried out in this study has contributed to the advancement of the democratization of artificial muscles through the development of a large-scale production method for low-cost reinforced polymer artificial muscles.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	III
RÉSUMÉ.....	IV
ABSTRACT	VI
LISTE DES TABLEAUX.....	X
LISTE DES FIGURES.....	XI
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XIV
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE.....	3
2.1 Pultrusion thermoplastique	3
2.2 Fabrication de muscles artificiels	7
2.3 Performance de la contraction des muscles artificiels spiralés.....	10
2.4 Modélisation des muscles artificiels.....	13
2.5 Synthèse de la problématique et objectifs	13
CHAPITRE 3 PRODUCTION DES FILAMENTS DE KEVLAR/TPU SPIRALÉS	15
3.1 Méthode expérimentale	15
3.1.1 Matériaux	15
3.1.2 Équipement de pultrusion TP.....	16
3.1.3 Préparation de la matière première pour la pultrusion	17
3.1.4 Pultrusion des filaments à muscle	22
3.2 Résultats et discussion.....	23
3.2.1 Pultrusion	23
3.2.2 Microscopie.....	25
3.3 Conclusion.....	27
CHAPITRE 4 METTRE EN FORME DES MUSCLES ARTIFICIELS SPIRALÉS	28
4.1 Méthode expérimentale	28

4.2	Résultats et discussion	33
4.2.1	Progression de la mise en forme	33
4.2.2	Nodules.....	34
4.2.3	Morphologie du muscle spiralé Kev/TPU.....	37
4.3	Conclusion.....	38
CHAPITRE 5	ACTIVER LES MUSCLES ARTIFICIELS.....	39
5.1	Méthode expérimentale	39
5.2	Résultats et discussion	41
5.2.1	Évaluation de la contraction des muscles artificiels produits	41
5.2.2	Comparatif des performances des autres types de muscles.....	45
5.3	Conclusion.....	46
CHAPITRE 6	MODÉLISER L'ACTIVATION DES MUSCLES ARTIFICIELS	48
6.1	Principe modèle cinématique.....	48
6.2	Méthode expérimentale	50
6.2.1	Récolte de données dimensionnelles.....	50
6.2.2	Analyse thermique.....	51
6.2.3	Modèle et environnement de design.....	53
6.3	Résultats et discussion.....	55
6.4	Conclusion	58
CHAPITRE 7	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....	59
7.1	Conclusion.....	59
7.2	Recommandations	60
RÉFÉRENCES.....		62

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Différents muscles artificiels spiralés, leurs caractéristiques et leurs performances	12
Tableau 3.1 : Dsc , vf et RR pour les huit filières utilisées pour produire le filament à muscle ...	18
Tableau 3.2 : Détermination de la torsion des précurseurs	22
Tableau 3.3 : Température de consigne des filières pour la pultrusion du filament à muscle	22
Tableau 5.1 : Différents muscles artificiels spiralés et leur performance	45
Tableau 6.1 : Données géométriques du parcours de fibre selon l'état du muscle et sa compensation	50

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Muscles artificiels torsadés, a) Polymère vierge (Nylon) [3], b) Polymère renforcé (CF/PDMS) [4].....	1
Figure 2.1 : Matières premières utilisées en pultrusion TP [15]	3
Figure 2.2 : Schéma de la pultrusion TP non réactive à matière première hybride	5
Figure 2.3 : Parcours en hélice de fibres d'une section de filament tordue, a) Parcours idéalisé des fibres en couche extérieure, b) Parcours balancés des fibres en couche extérieure avec migration de niveau, c) Parcours idéalisé des fibres du noyau, d) Parcours balancés des fibres du noyau avec microflambement [32].....	6
Figure 2.4 : Différents types de HTAM et le mouvement causé par leur activation [2] Droits obtenus	8
Figure 2.5 : Étape de la formation des spires par la méthode IST [39] Droits obtenus.....	9
Figure 2.6 : Schéma de l'indice de ressort des muscles artificiels spiralés (vue axiale)	10
Figure 2.7 : Schéma d'activation des muscles artificiels spiralés par expansion radiale	11
Figure 3.1. Fil de TPU (en haut) et fil de Kevlar (en bas) utilisés comme matière première	15
Figure 3.2: Schéma de l'appareil de pultrusion et de ses sous-sections.....	16
Figure 3.3. Géométrie des surfaces de moulage typique des filières. a) Filière chauffante. b) Filière refroidissante et tube de refroidissement de 75mm.....	17
Figure 3.4 : Paire de fils Kev/TPU dont les deux extrémités sont enroulées	19
Figure 3.5 : Composition de la matière première préparée avec la méthode des fils spiralés	20
Figure 3.6 : Représentation de l'angle de torsion α pour un pas de torsade h.	21
Figure 3.7 : Faisceau de matière première entre les filières 3 et 4, a) Arrachement des fils de TPU en périphérie à la sortie des filières avec la méthode de fils co-enroulés sur bobines séparées, b) Fils en périphérie intacts à la sortie des filières avec la matière première assemblée par torsion.....	24
Figure 3.8 : Fil Kevlar/TPU torsadé pultrudé avec $\alpha_{post} = 5^\circ$	25

Figure 3.9 : Micrographie d'un fil Kevlar/TPU torsadé pultrudé de $\varnothing 1\text{mm}$ avec $\alpha_{post} = 5^\circ$	25
Figure 3.10 : Mesure de l'angle de torsion des configurations de précurseurs, a) 5° ciblé, b) 10° ciblé, c) 15° ciblé, d) 20° ciblé	26
Figure 4.1 : Schéma de mise en forme d'un muscle artificiel par « Twist insertion »	28
Figure 4.2 : Système de mise en forme automatisé et d'activation thermique de muscles spiralés, a) châssis et composantes principales pour la mise en forme par torsion, b) tube de chauffage en quartz avec thermocouples et entrée d'air inférieure, c) poids tension guidés avec pointe de mesure, d) élément chauffant à air comprimé	29
Figure 4.3 : Augmentation du pas de spire par réduction du nombre de tours ajoutés, a) avant réduction du nombre de tours, b) après réduction du nombre de tours	31
Figure 4.4 : Préparation d'un échantillon de fil horizontal pour microscopie, a) Installation du fil sur le fond amovible, b) Ajout de la section cylindre supérieure, c) Installation des boulons-écrous et enrobage de l'échantillon, d) Échantillon horizontal enrobé	32
Figure 4.5 : Muscles artificiels au repos, a) sans stabilisation, b) avec stabilisation	33
Figure 4.6 : Évolution de la mise en forme de muscle artificiel spiralé par « Twist insertion », 1) Filament à muscle sous tension, 2) Torsion ajoutée au filament, 3) Formation de la première spire, 4) Croissance du nombre de spires, 5) Filament entièrement couvert de spires	34
Figure 4.7 : Nodules en formation à intervalle régulier sur la longueur du fil à muscle	35
Figure 4.8 : Coupe transversale de deux nodules apparaissant sur le fil	35
Figure 4.9 : Parcours des fibres d'une section de fil tordu, a) sans torsion ajoutée, b) torsion ajoutée, non compensée, c) torsion, longueur compensée	36
Figure 4.10 : Muscle artificiel spiralé 15° Kevlar/TPU sous tension dans le tube de chauffage à température pièce	37
Figure 5.1 : Amplitude d'activation d'un muscle artificiel de 40 cm fait avec le filament torsadé à 5° exposé à un environnement de différentes températures	40
Figure 5.2 : Performance des premiers cycles d'activation thermique du muscle 15° , a) Position du chariot selon la phase d'activation, b) Amplitude d'activation des premiers cycles	41

Figure 5.3 : Comparaison du pourcentage d'activation moyen sur 5 cycles d'un muscle de chaque configuration avec l'équipement de test de la Figure 4.2	42
Figure 5.4 : Pourcentage d'activation des muscles de 15° et 20° selon la température de l'environnement et prolongement de la trajectoire de performance initiale du muscle 20° .	43
Figure 5.5 : Amplitude et pourcentage d'activation thermique du muscle 15° selon la masse du chariot de poids pour 5 cycles thermiques entre 25°C et 105°C.....	44
Figure 6.1 : Schéma du parcours de fibres selon l'état d'un muscle, a) Muscle artificiel spiralé initial, b) Fibres idéalisées à l'état initial, c) Fibres idéalisées à l'état chauffé, d) Fibres idéalisées à l'état final compensé	49
Figure 6.2 : Schéma des dimensions du muscle nécessaires à sa modélisation	51
Figure 6.3 : Système de mesure d'expansion thermique, a) installation réelle, b) schéma explicatif	52
Figure 6.4 : Vue d'un filament à muscle et d'un échantillon de calibration en aluminium 6061 enduit de peinture au motif moucheté pour la mesure d'expansion thermique par CIN	53
Figure 6.5 : Schéma du fonctionnement de l'environnement de design, a) Modélisation numérique du muscle de référence, b) Modélisation numérique de l'itération du muscle activé , c) Calcul du pourcentage d'activation final.....	54
Figure 6.6 : Muscle artificiel spiralé, a) Réel, b) Modélisé numériquement.....	55
Figure 6.7 : Expansion thermique radiale du fil à muscle Kevlar/TPU selon la température.....	56
Figure 6.8 : Pourcentage d'activation du muscle 15° selon la température de l'environnement expérimental et modélisé.....	57

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

$\%_{act}$	Pourcentage d'activation
A_c	Aire de composite
A_{fil}	Aire du fil
A_{kevlar}	Aire de Kevlar dans un fil
$A_{matière,in}$	Aire de la matière première à l'entrée d'une filière
A_{TPU}	Aire de TPU dans un fil
α	Angle de torsion du filament
α_f	Angle de torsion du filament final après contraction
α_{post}	Angle de torsion après pultrusion
$\alpha_{pré}$	Angle de torsade avant pultrusion
β_i	Angle de spire
β_f	Angle de spire final après contraction
β_i	Angle de spire initial
CF	Fibre de carbone
CIN	Corrélation d'images numériques
CNT	Nanotubes de carbone
COCe	Copolymère d'oléfine cyclique
Δl	Contraction pour une section du muscle
$\Delta r/r$	Expansion thermique radiale
D	Diamètre de spire
d	Diamètre du filament
D_{sc}	Diamètre section constante filière
MEF	Modélisation par éléments finis

h	Pas de torsion
HTAM	Muscle artificiel hautement tordu
IST	Insertion de spires par torsion
L_{act}	Longueur activée du muscle
l_{fe}	Longueur de la fibre extérieure
$l_{fe,f}$	Longueur finale de la fibre extérieure
$l_{fe,i}$	Longueur initiale de la fibre extérieure
l_{fm}	Longueur de la fibre musculaire
$l_{m,f}$	Longueur finale du muscle
$l_{m,i}$	Longueur initiale du muscle
$l_{m,j}$	Longueur d'itération du muscle
$l_{m,j+1}$	Longueur de la prochaine itération du muscle
l_{norm}	Longueur normalisée du muscle
l_{sc}	Longueur section constante filière
m_{act}	Masse soulevée lors de l'activation
μ_{fil}	Masse linéique du fil
n_{kevlar}	Nombre de fils de kevlar
N_s	Nombre de spires
N_t	Nombre de tours de la fibre
p_f	Pas de spire final après contraction
p_i	Pas de spire initial
ρ_{fil}	Densité matériau du fil
R_{ext}	Rayon extérieur du muscle
r_{fm}	Rayon du filament muscle

$r_{fm,f}$	Rayon final du filament muscle dilaté
$r_{fm,i}$	Rayon initial du filament muscle
R_R	Ratio de remplissage
R_s	Rayon de spire
P_s	Pas de spire
PDMS	Polydiméthylsiloxane
PE	Polyéthylène
T	Tension appliquée au muscle
TAM	Muscle artificiel à torsion
TCAM	Muscle artificiel torsadé
TP	Thermoplastique
TPM	Tours par mètres
TPM	Nombre de rotations appliquées pour 1 mètre de filament
TPU	Thermoplastique polyuréthane
TSAM	Muscle artificiel en spirale
v_f	Taux de fibres volumique
W_{norm}	Travail d'un muscle d'une longueur normalisée

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Les muscles artificiels sont des actuateurs sans pièces mobiles, engrenages, roulement à billes ou moteurs électriques. Ces actuateurs peuvent pivoter, s'allonger ou se contracter, ne compte qu'une seule pièce et réagissent par stimulus provenant, en mode passif, de l'environnement ou encore en mode actif, par stimulus généré au sein même du muscle. Une catégorie des muscles artificiels est les muscles artificiels torsadés. Leur activation, causée en changeant leur température, repose sur les propriétés anisotropes du filament utilisé pour leur production : le filament doit posséder un coefficient d'expansion radial élevé jumelé à un coefficient d'expansion axiale nulle ou négative. Les premiers muscles de ce type ont été produits avec des fuseaux de nanotubes de carbone (CNT) [1]. Cependant, le fort coût associé à l'utilisation des CNT limite leur démocratisation et donc leur utilisation plus courante [2]. La Figure 1.1a montre un exemple de muscles artificiels à base de filament polymère à bas coûts, comme le fil de pêche en Nylon, qui ont été proposés par Haines, *et al.* [3]. Malgré leur grande accessibilité, ces muscles sont tout de même limités par la faible résistance des filaments de polymère vierge. Lamuta, *et al.* [4] ont produit des muscles de polymère renforcés en utilisant des filaments de silicone renforcés de fibres de carbone continues (voir Figure 1.1b). Les muscles produits en torsadant ces filaments offrent les performances avantageuses associées aux muscles de CNT, mais en utilisant des fibres de renforts commercialement disponibles comme les fibres de carbone.

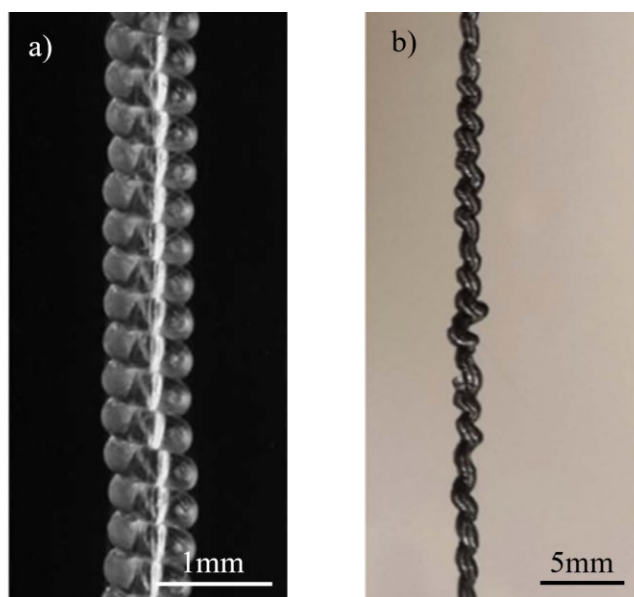


Figure 1.1 : Muscles artificiels torsadés, a) Polymère vierge (Nylon) [3], b) Polymère renforcé (CF/PDMS) [4]

La fabrication répétable et à grande échelle de ces muscles est cependant complexe à cause de l'utilisation de polymères élastomères comme le silicone pour leur matrice. Leur mise en forme est manuelle [5]. Afin de faire progresser la popularisation des muscles artificiels, un nouveau procédé de fabrication pour les muscles de polymère renforcé à grande échelle est nécessaire. La pultrusion thermoplastique est un procédé de fabrication produisant des matériaux composites à section constante et à haut taux de fibres de façon continue [6]. Le polyuréthane thermoplastique (TPU) est un élastomère possédant un fort coefficient d'expansion thermique pour un TP de $145 \mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{K}$ [7]. La fibre de Kevlar possède un coefficient d'expansion linéaire négatif de $-3,76 \mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{K}$ [8, 9]. L'objectif de ce projet de recherche est donc de développer des muscles artificiels torsadés fonctionnels produits à base de filaments composites Kevlar/TPU pultrudés.

Ce mémoire débute par une revue de la littérature présentant le procédé de pultrusion thermoplastique. La fabrication des muscles artificiels torsadés, leurs méthodes d'activations et leur contraction sont ensuite montrées, suivies d'une brève revue des modèles de prédiction de performance existants. La deuxième portion du mémoire, englobant les chapitres trois à six, décrit les travaux complétés pour l'atteinte des 4 sous-objectifs de cette étude: la pultrusion de filaments de 1mm de diamètre en Kevlar/TPU tordu, la mise en forme de muscles artificiels torsadés avec le filament pultrudé, la caractérisation de la performance des muscles artificiels mis en forme, et finalement, la création d'un modèle cinématique de l'actuation des muscles.

CHAPITRE 2 Revue de littérature

2.1 Pultrusion thermoplastique

La pultrusion est un procédé de fabrication produisant des profilés en matériaux composites. Les produits résultants de ce procédé possèdent une section transversale constante et sont composés de fibres de renforts imprégnées de polymère. Un grand éventail de fibres de renforts ainsi que de polymères peuvent être utilisées. Les polymères traités sont regroupés en deux groupes principaux : les thermodurcissables et les thermoplastiques (TP). La pultrusion de composite renforcé à fibres continues utilisant une matrice thermodurcissable est un procédé bien établi et largement utilisé comparativement à la pultrusion avec matrice TP, malgré leurs avantages [6]. Les composites TP offrent une plus grande ténacité ainsi qu'une meilleure tolérance aux dommages en plus de la possibilité d'être reformés, recyclés et soudés [10]. Cependant, les TP fondues possèdent une viscosité élevée, généralement entre 5×10^5 cP et 5×10^6 cP, par rapport aux thermodurcissables non polymérisés qui se trouve entre 500 cP et 2000 cP [11-13]. Cela rend difficile leur traitement en pultrusion et mène généralement à une dispersion non proportionnelle des fibres et une imprégnation de mauvaise qualité des profils pultrudés [14]. La Figure 2.1 montre les différentes technologies de pultrusion et matières premières développées afin de pallier cette lacune des TP.

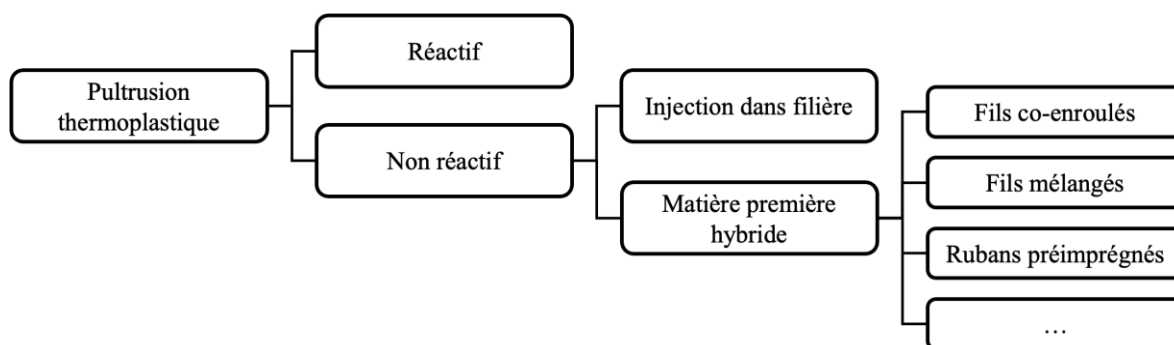


Figure 2.1 : Matières premières utilisées en pultrusion TP [15]

La technologie de pultrusion TP réactive se rapproche de la pultrusion avec thermodurcissables. Elle utilise des monomères et catalyseurs à faible viscosité en entrée, afin d'imprégner les fibres avant la polymérisation de la matrice TP [15]. Cependant, la variété de polymères adéquats pour la pultrusion réactive présentement disponibles est limitée [16]. Les technologies non réactives utilisent des TP déjà polymérisés qu'il faut fondre pour imprégner les fibres. Une première approche est d'injecter le polymère dans la filière de pultrusion à l'aide d'une extrudeuse. Cette approche ouvre le champ des polymères disponibles pour la pultrusion en profitant de la chaîne

d'approvisionnement de polymères en granules très développée. Cependant, la haute viscosité des polymères TP fondus limite la taille des profils pultrudés à des rubans, car la distance d'imprégnation de profils pultrudés épais demande un temps d'imprégnation long. Une troisième approche non réactive pour compenser la viscosité élevée des TP est l'utilisation de matière première hybride. Il s'agit de fils qui combinent les fibres de renforts et le polymère. Ainsi, la distance couverte par le polymère pour imprégner les fibres de renforts est réduite. Parmi les différents types de matière première hybride, les fils co-enroulés placent les torons de fibres de renfort et de polymère côte à côte. La distance d'imprégnation devient donc égale au rayon des torons de fibres sèches. Les fils mélangés réduisent davantage la distance d'imprégnation en utilisant un procédé d'entremêlement des fils de matière première. Le fil polymère est distribué plus ou moins uniformément à travers les fibres de renfort selon la qualité du mélange. Les rubans préimprégnés rendent essentiellement la distance d'imprégnation du polymère nulle.

La Figure 2.2 montre un schéma d'appareil de pultrusion TP non réactive à matière première hybride. Le premier composant est le cantre. Les fils de matière première sont enroulés sur des bobines qui sont fixées sur le cantre. Ce dernier positionne les bobines de manière à les laisser se dérouler à une tension de consigne avec l'avancement de la pultrusion [17]. Les fils de matière première subissent ensuite une préchauffe où leur température augmente sans être comprimée. Ils entrent ensuite dans la zone de chauffage où le polymère atteint sa température de procédé et imprègne les fibres de renfort. Cette zone est composée d'une filière de chauffage muni d'une cavité conique. La forme de la cavité réduit graduellement l'espace disponible pour la matière première avec son avancement. Cela augmente la pression appliquée sur le polymère fondu qui vient imprégner les fibres de renfort. Afin d'assurer la bonne imprégnation du profil pultrudé, le taux de remplissage de la filière doit être supérieur à 100%. Le taux de remplissage est déterminé par le rapport entre l'aire de la section transversale du matériau d'entrée sur l'aire du profil pultrudé [18]. Cette restriction cause une accumulation du polymère excédentaire et génère un écoulement de refoulement dans la section conique. L'écoulement de refoulement du polymère fondu excédentaire participe à la pression d'imprégnation sur la matière première entrant dans la filière [19]. La zone de refroidissement qui suit solidifie le polymère et complète la mise du profil pultrudé. Finalement, un tracteur suivant la sortie de la zone de refroidissement contrôle la vitesse d'avancement de la matière à travers le procédé de pultrusion. Une scie, non montrée sur la Figure 2.2, suit le tracteur pour couper le profil pultrudé à la longueur désirée.

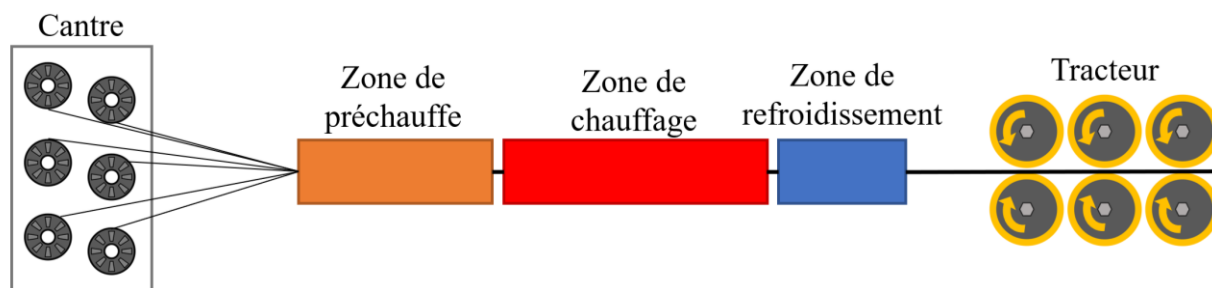


Figure 2.2 : Schéma de la pultrusion TP non réactive à matière première hybride

Le procédé de pultrusion TP permet de produire une grande variété de profils composites avec des géométries complexes ou des sections creuses [8]. Cependant, les profils de petites sections sont peu étudiés en dehors des filaments d'impression 3D par dépôt de fil fondu. Les travaux existants rapportent des difficultés d'imprégnation. Les filaments pultrudés présentent simultanément des agglomérations de fibres sèches, des sections riches en polymère ainsi que des zones de porosités [20, 21]. La pultrusion multifilières a été développée afin d'améliorer la qualité d'imprégnation des composites TP pultrudés [22, 23]. Cette technologie applique une pression cyclique sur la matière première pultrudée lors de son passage dans une série de filières dont l'aire de sortie réduit graduellement. La compaction des fibres est relâchée entre chaque filière, ce qui permet de faciliter le passage du polymère durant l'imprégnation. Une amélioration de l'imprégnation dans les filaments pultrudés de petit diamètre a été constatée avec l'utilisation de la pultrusion à filières multiples [24, 25]. Un autre enjeu de la pultrusion TP est la qualité du fini de surface des composites pultrudés. Alsinani, et al. [26] ont utilisé un système de refroidissement composé d'un tube à paroi mince refroidi à l'eau en commun avec un système multifilières [27]. Ils ont démontré l'impact positif du système sur la qualité du fini de surface de tiges pultrudées de 4.76 mm de diamètre.

L'entrée initiale de la matière dans les filières à petite section cause des difficultés, car il est difficile de faire passer les fils non consolidés, possédant un surplus de matière, à travers l'ouverture des filières de pultrusion. Des filières adaptées dont la section de moulage peut être séparée en deux afin d'enfiler les fils de matière première ont été développées [25]. Une alternative permettant d'utiliser des filières conventionnelles est le lancement de pultrusion par lot (de l'anglais *batch pultrusion*). Une boucle de fil d'acier est passée à travers la filière et les fils de matière première sont enfilés dans la boucle à l'entrée de la filière. Le tracteur est ensuite mis en marche et fait avancer la boucle de fil d'acier, les fils de matière première enfilés forment un coude au point de contact avec la boucle et sont entraînés à travers la filière chauffée par leur milieu de la matière première et non par leur pointe [28].

Les TP traités par pultrusion sont divisés en deux groupes principaux : amorphes et semi-cristallins. La classification d'un polymère dépend de son arrangement moléculaire. Les TP amorphes, comme le polycarbonate et le PEI, sont composés de chaînes polymériques désordonnées. Les TP semi-cristallins, comme le Polypropylène et le Polyamide, contiennent une phase hautement ordonnée, la phase cristalline, dispersée dans une phase amorphe [26]. Les polyuréthanes thermoplastiques (TPU) se trouvent à la frontière entre les deux catégories. Les TPU sont de copolymères communément utilisés en moulage par injection composés de segments mous et de segments durs [29]. Les segments mous sont composés de longues chaînes moléculaires amorphes. Les segments durs sont composés de matériaux polaires se regroupant en amas plus ordonnés. Le partage entre ces deux types de segments affecte les propriétés mécaniques des TPU [30]. Des tiges pultrudées en fibre de verre et TPU haute dureté ont été produites grâce à une résine propriétaire spécialement formulée pour réduire la viscosité du TPU chauffé [31]. Sinon, peu d'études utilisant des fils de TPU comme matière première pour la pultrusion TP ont été trouvées.

Lors de fabrication de filament multifibres torsadés, les fibres suivent des hélices dans le filament. La Figure 2.3 schématise les parcours idéalisés et balancés de différentes fibres isolées en couche extérieure puis au cœur d'un filament torsadé. Les parcours idéalisés, en Figure 2.3 a) et c), assument une répartition et un parcours parfaits des fibres, alors que les parcours balancés en Figure 2.3 b) et d), tiennent compte des conditions et interactions agissant sur les fibres qui les font déviés du parcours idéalisé.

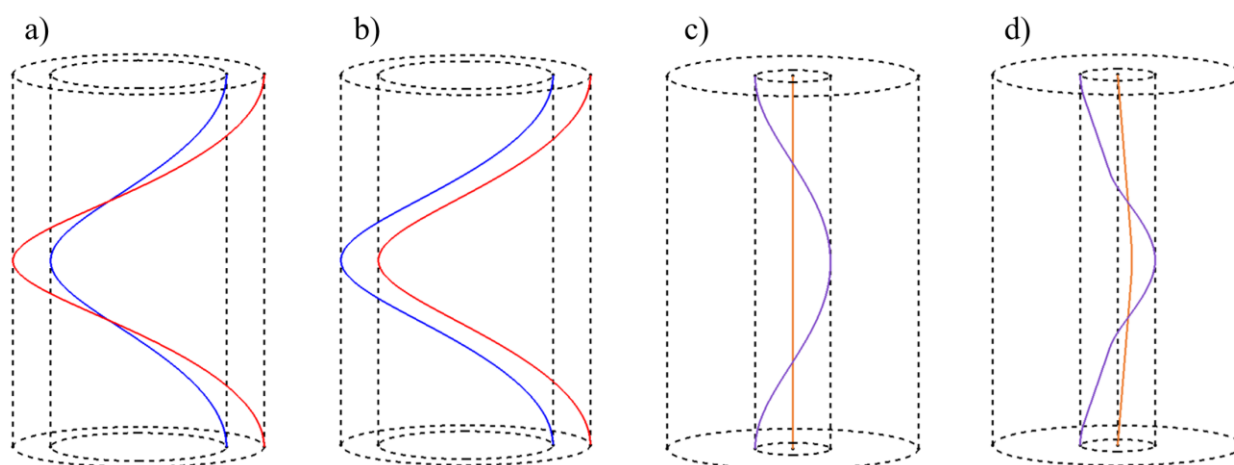


Figure 2.3 : Parcours en hélice de fibres d'une section de filament tordue, a) Parcours idéalisé des fibres en couche extérieure, b) Parcours balancés des fibres en couche extérieure avec migration de niveau, c) Parcours idéalisé des fibres du noyau, d) Parcours balancés des fibres du noyau avec microflambement [32]

La Figure 2.3 a) montre le parcours idéalisé de deux fibres orbitant autour du centre du filament tordu en restant sur la même couche de ce dernier. Cependant, le parcours des fibres plus éloignées du centre est nécessairement plus long que celui des fibres internes dont le rayon d'hélice est plus petit. Cela crée donc un gradient de tension dans les fibres torsadées, atteignant un point maximal sur à la surface du faisceau. Cette tension plus élevée exerce une force radiale sur les fibres et les pousse à migrer en direction du centre, vers un niveau à moindre tension, déplaçant ainsi les fibres occupant l'espace vers l'extérieur à leur tour [32]. La Figure 2.3 b) montre une version équilibrée du parcours des fibres. Dans cette version, la distance entre le centre et les fibres oscille entre différents niveaux plus ou moins extérieurs. Cela a comme effet de balancer la tension des fibres en égalisant la longueur de leur parcours. La Figure 2.3 c) montre le parcours idéalisé de deux fibres dans le noyau du filament. L'une des fibres se trouve au centre du fil et n'oscille donc pas à travers le filament. Selon Naik and Madhavan [32], la tension présente dans les fibres en couche extérieures applique non seulement une force radiale sur ces dernières, mais aussi une force axiale. Les fibres au cœur du filament subissent donc une compression axiale. La Figure 2.3 d) montre l'impact du microflambement causé par la compression axiale des fibres du noyau. Les travaux revus montrent que les filaments formés de fibres torsadées peuvent contenir des fibres qui migrent de couches et même flamber au centre.

2.2 Fabrication de muscles artificiels

Les muscles artificiels torsadés (TCAM) font partie de la catégorie générale des muscles artificiels hautement tordus (HTAM). La Figure 2.4 montre la géométrie et le mouvement d'activation des différents types de HTAM : les muscles artificiels à torsion (TAM), les TCAM et les muscles artificiels en spirales (TSAM). Le fonctionnement de tous ces muscles est basé sur des filaments hautement tordus sur eux-mêmes possédant des propriétés d'expansion volumique anisotropes, spécifiquement la combinaison d'une forte expansion radiale associée à une expansion axiale nulle ou négative [2].

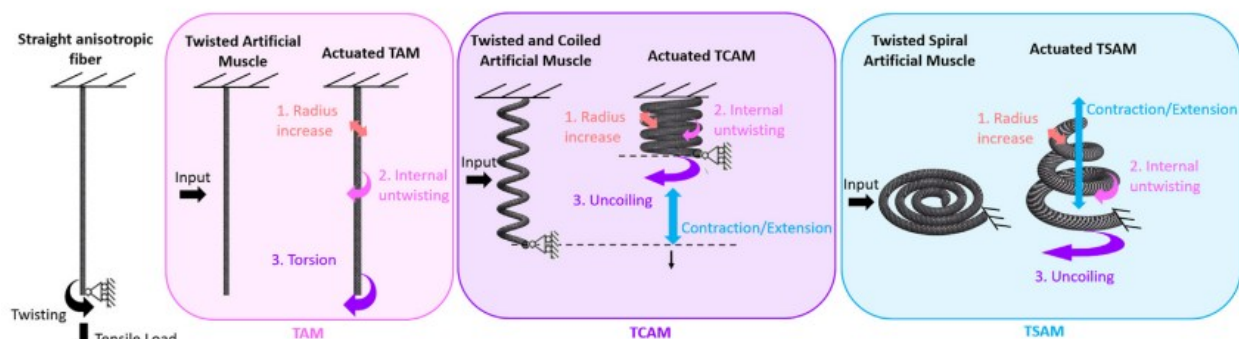


Figure 2.4 : Différents types de HTAM et le mouvement causé par leur activation [2] Droits obtenus

Les matériaux utilisés pour la production de HTAM sont regroupés en deux familles principales : les polymères purs ainsi que les polymères renforcés. Certains des polymères purs utilisés sont le polyéthylène (PE) et le Nylon [3]. Ces matériaux possèdent des propriétés d'expansion thermique adéquates, mais sont limités par leur faible résistance de comparément aux CNT. Le PE et Nylon possèdent une résistance à la traction inférieure à 100 MPa alors que les CNTs imprégnés atteignent 850 MPa [33-35].

Des fibres de renforts sont donc ajoutées aux polymères purs ainsi d'améliorer leur résistance. Certaines des combinaisons utilisées sont les fibres de carbone et le silicone [4], ainsi que les CNT combinés à une variété de polymères comme la cire [1], le polyester et le PET [36]. Les polymères utilisés sont donc généralement des élastomères ou des TP possédant un grand coefficient d'expansion thermique. Les fibres de carbone ainsi que les CNT sont utilisées pour leur expansion thermique axiale nulle. Les polymères utilisés sont donc généralement des élastomères ou des TP amorphes possédant un coefficient d'expansion thermique.

Comme montre la Figure 2.4, la phase initiale de production pour tous les types de HTAM est la torsion sous tension des filaments sélectionnés. Dans le cas des TAM, la mise en forme est complétée à cette phase, mais la formation de spires est nécessaire pour obtenir les TCAM et TSAM. Une première option est la mise en forme par mandrin. Les TCAM utilisent un mandrin cylindrique alors que les TSAM utilisent un mandrin conique. Les filaments tordus sous tension sont enroulés autour du mandrin possédant les dimensions souhaitées pour le muscle artificiel final. La forme du muscle est ensuite verrouillée lors d'une période de stabilisation thermique. Les TCAM peuvent aussi être produits sans l'utilisation d'un mandrin, soit par le formage par torsion de couches [37, 38] ou par l'insertion de spires par torsion [4]. Le formage par torsion de couche

consiste à tordre simultanément plusieurs filaments à muscle l'un sur l'autre où les filaments adjacents agissent comme mandrins pour leur voisin. L'insertion de spires par torsion (IST) est la méthode la plus simple parmi les trois. La Figure 2.5 montre l'évolution de la mise en forme de muscles artificiels torsadés par la méthode IST. L'ajout de torsion sous tension dans les filaments à muscle est prolongé jusqu'à ce que le fil devienne instable et que la formation spontanée de spires soit amorcée. La torsion est augmentée jusqu'à ce que l'entièreté du filament soit couverte de spires.



Figure 2.5 : Étape de la formation des spires par la méthode IST [39] Droits obtenus

Suite à la mise en forme des muscles par IST, les muscles peuvent être utilisés sans stabilisation thermique si leurs extrémités restent contraintes afin d'éviter le déroulement de la torsion du fil et la perte des spires formées. Si le polymère utilisé le permet, la stabilisation thermique permet de figer la forme et de retirer les contraintes rotationnelles sur le muscle.

Les muscles artificiels peuvent être apparentés à des ressorts. L'indice de ressort d'un muscle artificiel spiralé peut donc être calculé par le ratio entre son diamètre de spire D et le diamètre du filament de muscle d tel que :

$$\text{Indice de ressort} = \frac{D}{d}. \quad (1)$$

La Figure 2.6 montre les caractéristiques géométriques des muscles artificiels selon leur index de ressort pour un filament d'épaisseur constante.

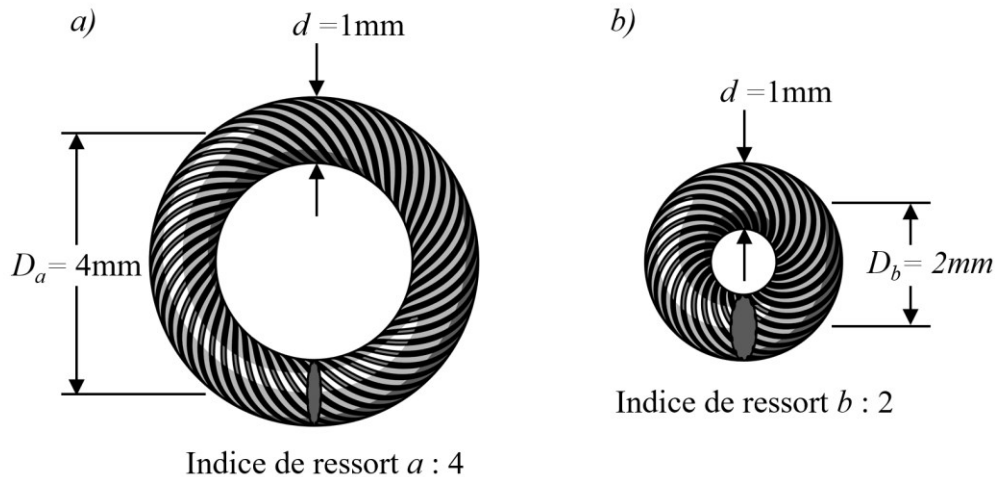


Figure 2.6 : Schéma de l'indice de ressort des muscles artificiels spiralés (vue axiale)

Pour un même filament à muscle initial, la méthode de mise en forme par mandrin produit des muscles ayant un indice de ressort plus grand que les muscles formés par la méthode d'insertion de spires par torsion et sont moins rigides. Les muscles par mandrins sont donc mieux adaptés aux applications à faible force et longue distance d'activation. Les muscles par IBT sont priorisés pour les applications nécessitant une plus grande force d'activation au coût d'une plage de contraction plus restreinte [2]. Dans le cadre de cette étude, le terme « muscle artificiel spiralé » sera utilisé pour décrire les TCAM.

2.3 Performance de la contraction des muscles artificiels spiralés

La contraction des muscles artificiels vient du grand ratio entre l'expansion radiale par rapport à l'expansion axiale du filament utilisé pour leur mise en forme. Selon Lamuta, et al. [4], l'expansion radiale du filament mène à l'augmentation de son diamètre. Le muscle étant une forme de ressort, l'augmentation de rayon du filament affecte ses propriétés et mène à un ressort possédant une rigidité supérieure. Pour une charge constante, cela mène donc à la contraction du muscle artificiel. La géométrie du muscle ainsi que les propriétés mécaniques du filament influencent les propriétés du ressort formé. Les ressorts possédant un indice de ressort plus faible, pour un même filament, se trouvent être moins rigides et peuvent donc accomplir de plus grande contraction à moindre charge. La Figure 2.7 montre un schéma de l'activation des muscles artificiels spiralés où une contraction (Δl) est causée par l'augmentation du rayon de filament (r_{fm}). Cela mène à une augmentation de l'angle de spire (β) et à une réduction du pas de spire (p).

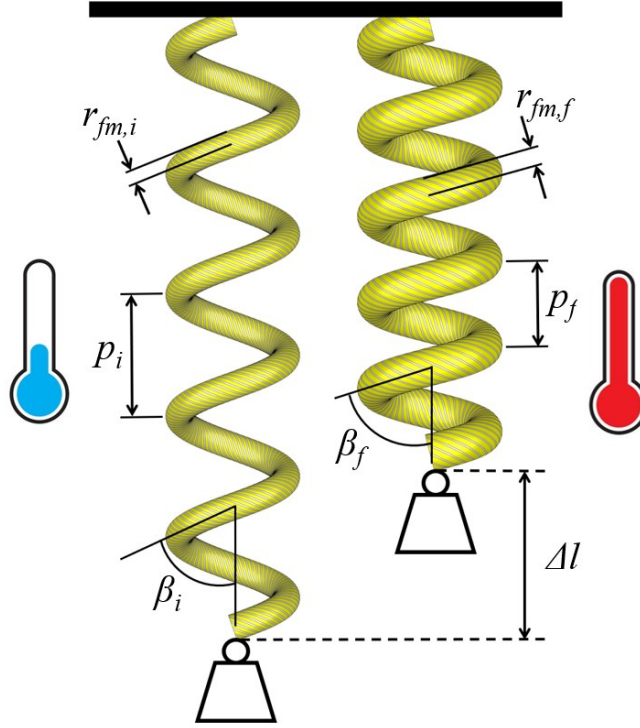


Figure 2.7 : Schéma d'activation des muscles artificiels spiralés par expansion radiale

L'expansion de r_{fm} peut être dirigée par plusieurs mécanismes différents : le gonflement chimique, l'expansion thermique ou encore la photosensibilité [2]. Le mécanisme le plus répandu est l'expansion thermique, particulièrement par chauffage par effet Joule. L'expansion thermique du muscle peut aussi être enclenchée par un écoulement enveloppant de fluide chaud (liquides, air) ou par chauffage radiatif.

Le Tableau 2.1 montre les caractéristiques de différents muscles artificiels spiralés activés par expansion thermique. Les dimensions de leur section transversale, la plage de température nécessaire à leur activation ainsi que les pourcentages d'activation atteints pour une certaine masse suspendue y sont recensés. Les dimensions données pour la section transversale des muscles artificiels sont celles pour leur état au repos à température pièce. Le pourcentage d'activation selon une certaine masse est l'indicateur de performance le plus commun dans la littérature. Le pourcentage d'activation $\%_{act}$ est calculé en normalisant la mesure de l'amplitude de la contraction du muscle Δl par la longueur du muscle activée l_{act} tel que :

$$\%_{act} = \frac{\Delta l}{l_{act}} \times 100\% . \quad (2)$$

Tableau 2.1 : Différents muscles artificiels spiralés, leurs caractéristiques et leurs performances

	Matériaux	Dimensions section transversale (μm)	Températures d'opération ($^{\circ}\text{C}$)	Masse soulevée (g)	Pourcentage d'activation (%)	Réf.
1	CNTs/Paraffine	$\emptyset 115$	20 à 2560	10	7,3	[1]
2	MXene/SWCNTs coated CNT/PDMS	$\emptyset 800$	20 à 150	14	18	[40]
3	PE/COCe	300 x 470	20 à 30	1	12	[41]
4	Fishing lines and sewing treads (Nylon 6)	$\emptyset 860$	25 à 95	500	12	[3]
5				20	45	
6	CF/PDMS	$\emptyset 384$	20 à 230	1890	25	[4]

Les muscles décrits au Tableau 2.1 peuvent être réunis en différentes catégories. La première englobe les muscles utilisant les nanotubes de carbone (CNT), lignes 1 et 2 du Tableau 2.1. Ces derniers possèdent des pourcentages d'activation allant de 7,3% à 18% lorsqu'une masse relativement faible, entre 10g et 14g, est soulevée. Les coûts de production de ce type de muscle sont importants cependant, dû au fort prix des CNTs [4]. La seconde catégorie englobe les muscles artificiels produits en polymère non renforcé, lignes 3, 4 et 5 du Tableau 2.1. Les muscles produits en Polyéthylène (PE) et Copolymère d'oléfine cyclique (COCe) offrent un pourcentage d'activation de 12%, mais cela, uniquement avec une masse soulevée de 1g. Les muscles à base de fil de pêche en Nylon 6 offrent un pourcentage d'activation identique aux muscles en COCe, mais avec une masse 500 fois plus importante. Les muscles en Nylon 6 ont aussi la capacité d'offrir un grand pourcentage d'activation de 45% lorsqu'une masse de 20g est soulevée. La troisième catégorie, ligne 6 du Tableau 2.1, englobe les muscles artificiels renforcés avec des fibres disponibles commercialement. Les muscles à base de fibres de carbone (CF) et de silicone Polydiméthylsiloxane (PDMS) sont adaptés pour soulever des masses d'ordres de grandeur plus élevés que les autres muscles décrits. Lorsque les muscles CF/PDMS sont comparés avec les muscles Nylon avec leur charge maximale, les muscles CF/PDMS obtiennent le double d'activation tout en soulevant une masse 378% plus importante que les muscles Nylon.

2.4 Modélisation des muscles artificiels

Plusieurs stratégies de modélisation ont été créées dans le but de modéliser et d'anticiper la performance d'activation des muscles artificiels tordus. Ces stratégies peuvent être divisées en deux familles : les modèles analytiques ainsi que les modèles par élément fini (MEF).

Les modèles analytiques, comme celui proposé par Lamuta, et al. [4], sont fondés sur le principe que les muscles artificiels spiralés peuvent être assimilés à des ressorts possédant des propriétés anisotropes. Les propriétés de rigidités en tension, en flexion et en torsion du filament composant les muscles artificiels peuvent être calculées. Selon ces propriétés ainsi que la charge appliquée au muscle, l'angle des spires du muscle β_i à l'état stable est calculé. Lors de l'activation, l'expansion radiale du filament augmente la rigidité du ressort et un nouvel angle de spire supérieur β_f est calculé. L'augmentation de l'angle de spire donne finalement la nouvelle longueur du muscle comme il est illustré à la Figure 2.7.

La modélisation de l'activation thermique des muscles d'analyse par éléments finis est présentement appliquée aux TAM en polymère non renforcés [42]. Il est assumé que les propriétés de la matière du filament à muscle sont identiques sur une même couche concentrique à l'axe central et que les propriétés locales évoluent avec l'augmentation de l'angle de torsion, ce dernier étant nul au centre du filament et atteignant sa valeur maximale en surface. Les muscles sont segmentés sur leur longueur en minces couches concentriques dont l'angle de biais des propriétés anisotropes suit l'évolution de l'angle de torsion à travers les couches. L'augmentation de l'épaisseur des couches minces induit ensuite un stress inégal à travers les couches, augmentant vers l'extérieur. Cela cause finalement une torsion du filament qui se contracte afin de retrouver une configuration équilibrée. Aucun travail utilisant cette méthode pour les muscles artificiels spiralés n'a été trouvé lors de la revue de littérature.

2.5 Synthèse de la problématique et objectifs

Dans les recherches relevées lors de la revue de littérature, peu de travaux se penchent sur la pultrusion de profilés à petit diamètre (moins de 1mm). Les composites pultrudés résultants de ces travaux possèdent des défauts majeurs. Les fibres de Kevlar et le TPU possèdent des propriétés intéressantes pour la fabrication de muscles artificiels grâce à leurs coefficients d'expansion thermiques maximisant le ratio entre l'expansion radiale et axiale du filament à muscle. Cependant,

aucune recherche rencontrée n'a fait de pultrusion de filaments de kevlar et de TPU ou tout autre TP élastomère avec un coefficient d'expansion thermique similaire. Le premier sous-objectif est donc de produire des filaments de Kevlar/TPU de 1mm de diamètre par pultrusion thermoplastique. Les travaux relatifs à l'atteinte de ce premier sous-objectif sont présentés au chapitre 3.

La revue de littérature a rapporté des travaux utilisant des TP comme le PET ou des élastomères comme le silicone, mais aucune recherche n'a produit de muscle artificiel en polymère renforcé utilisant la fibre de kevlar et un TP élastomère comme le TPU. Le deuxième sous-objectif est donc de produire des muscles artificiels spiralés en Kevlar/TPU. L'atteinte de ce sous-objectif est décrite au Chapitre 4.

Parmi les recherches sur l'activation des muscles artificiels spiralés produits avec des polymères renforcés, aucune n'a caractérisé la performance d'activation de muscle produit en Kevlar/TPU. La caractérisation de leur performance en activation thermique constitue le troisième sous-objectif de ce mémoire et son atteinte est présentée au chapitre 5.

La revue de littérature a ressorti deux alternatives pour la modélisation de la contraction des muscles artificiels spiralés : les modèles analytiques ainsi que la modélisation par MEF. Cependant, les modèles analytiques existants sont complexes et ils ne peuvent modéliser que certaines configurations géométriques. La modélisation MEF constitue aussi une méthode complexe dans le cadre de ces travaux et à la connaissance de l'auteur, peu de travaux sur ce sujet existent ou sont suffisamment évolués. Le quatrième sous-objectif est donc de développer un modèle cinématique simple de l'activation des muscles artificiels. L'atteinte de cet objectif est présentée au chapitre 6.

CHAPITRE 3 Production des filaments de Kevlar/TPU spiralés

Ce chapitre se penche sur les techniques, les matériaux ainsi les équipements utilisés afin de produire des filaments de Kevlar/TPU destinés à la fabrication de muscles artificiels spiralés.

3.1 Méthode expérimentale

3.1.1 Matériaux

La production de filaments en composite adaptés à la fabrication de muscles artificiels cherche à maximiser le ratio entre l'expansion radiale et axiale du filament. Les matériaux favorisés sont donc ceux ayant un coefficient d'expansion thermique plus élevés pour la matrice et pour les fibres de renfort, celles au coefficient d'expansion thermique linéaire nul et négatif. La matrice choisie est le TPU 95A, qui possède un coefficient d'expansion thermique d'environ $145 \mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{K}$ [7]. La fibre de renfort sélectionnée est le Kevlar qui est connu pour avoir un coefficient d'expansion thermique linéaire négatif dans le sens de la fibre d'environ $-3,76 \mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{K}$ et d'un coefficient d'expansion positif d'environ $66 \mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{K}$ dans le sens transverse de la fibre [9]. La Figure 3.1 montre les fils utilisés comme matière première pour la pultrusion.

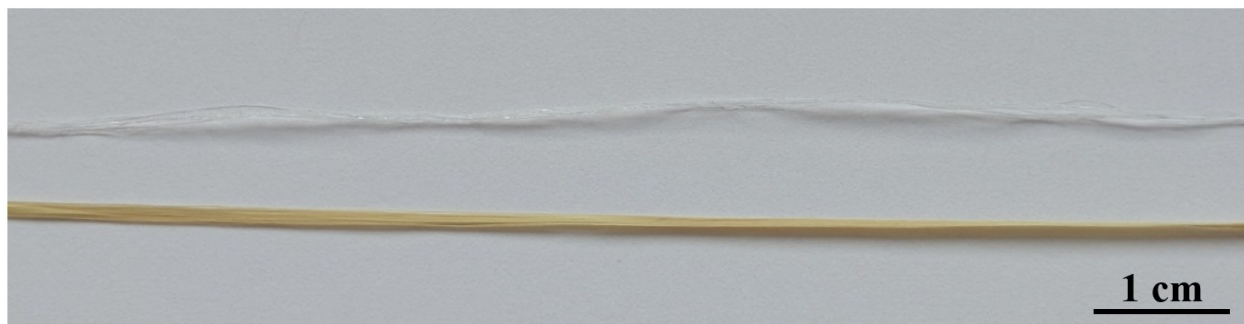


Figure 3.1. Fil de TPU (en haut) et fil de Kevlar (en bas) utilisés comme matière première

Le fil du haut dans la Figure 3.1 est un fil de TPU de 33,33 Tex (N20C22, Titan Textiles). Ce fil constitue la matrice du composite pultrudé. Il contient 48 filaments avec un diamètre estimé de $28 \mu\text{m}$. Le TPU utilisé a une dureté 95 Shore A. La densité du TPU spécifiée par le fabricant est de $1,12 \text{ g}/\text{cm}^3$. Le fil du bas dans la Figure 3.1 est un fil de 66,67 Tex (529, Titan Textiles) composé de 400 fibres de Kevlar. La densité du Kevlar est de $1,46 \text{ g}/\text{cm}^3$. Les fibres de Kevlar agissent comme renforts dans le composite pultrudé. Le coefficient d'expansion thermique du TPU et du Kevlar utilisé n'a pas été caractérisé et sont donc estimés à celles de la littérature.

3.1.2 Équipement de pultrusion TP

La Figure 3.2 montre l'appareil de pultrusion TP utilisé lors de la production des filaments composites. L'appareil est composé de 4 sections principales : le cantre, les filières de chauffage, la filière de refroidissement et le système de traction.

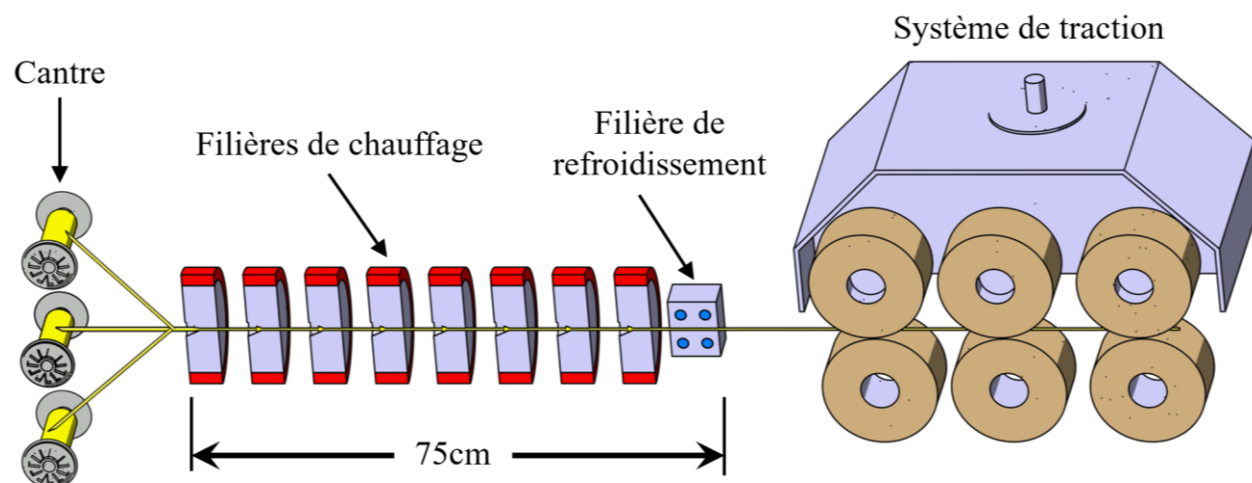


Figure 3.2: Schéma de l'appareil de pultrusion et de ses sous-sections

Le cantre permet de fixer les bobines sur lesquels les fils précurseurs sont enroulés. Lors de la pultrusion, le cantre assure le maintien de la tension désirée sur les fils qui sont entraînés dans les filières de chauffage. Cette tension peut être ajustée à une valeur précise selon la configuration. Le cantre est suivi de huit filières de chauffage. Les filières réchauffent les fils précurseurs et possèdent une surface de moulage conique. La série de filières possède un diamètre de sortie graduellement plus petit. Les diamètres de sortie de chaque filière sont listés au Tableau 3.1. Chaque filière de chauffage est équipée d'un élément chauffant céramique en cerceau, en rouge sur la Figure 3.2, pouvant fournir jusqu'à 800W de chauffage résistif. Les filières sont aussi équipées d'un thermocouple d'insertion positionné près de la surface de moulage de la filière afin d'assurer un contrôle de la température d'opération adéquat. L'asservissement en température est régulé par des contrôleurs (CN7500, Omega). La Figure 3.3 montre la géométrie typique de surface de moulage des filières de chauffage ainsi que la filière de refroidissement.

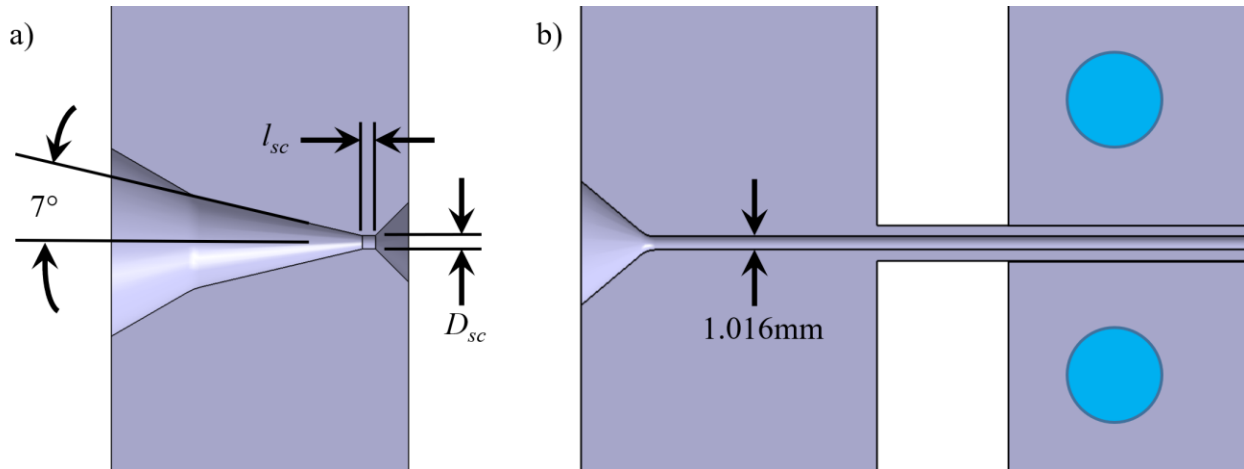


Figure 3.3. Géométrie des surfaces de moulage typique des filières. a) Filière chauffante. b) Filière refroidissante et tube de refroidissement de 75mm

Les filières chauffantes, dont la géométrie est illustrée à la Figure 3.3a), sont munies d'un cône de 7° et d'une section à diamètre constant dont la longueur est égale au diamètre de sortie de la filière tel que :

$$l_{sc} = D_{sc} \quad (3)$$

Afin de résister à l'usure causée lors de la pultrusion, les sections de moulage sont produites en tungstène. La dernière filière de chauffage est liée à la filière de refroidissement par un tube à section mince, selon le concept breveté développé dans Alsinani *et al.* [26, 27]. Le tube à un diamètre interne de 1,016 mm et externe de 1,575 mm. La Figure 3.3b) montre la filière de refroidissement. Cette dernière est percée au diamètre externe du tube de la dernière filière, pour permettre un glissement sur celui-ci tout en garantissant un échange thermique. La filière de refroidissement comprend plusieurs cavités séparées pouvant recevoir de l'eau provenant d'un système de refroidissement ou de l'air comprimé selon la température de refroidissement désirée. Finalement, le système de traction agrippe le fil pultrudé et l'entraîne à une vitesse constante à l'aide de roues en caoutchouc afin d'éviter la formation de bris sur la surface du fil.

3.1.3 Préparation de la matière première pour la pultrusion

La matière première de pultrusion est assemblée avec plusieurs fils de TPU et de Kevlar pour remplir les filières de pultrusion et obtenir la proportion de fibres souhaitée dans le filament pultrudé. Cette proportion est exprimée par le ratio volumique de fibres (v_f) qui est obtenu par :

$$v_f = \frac{n_{Kevlar} \times A_{Kevlar}}{A_c} \quad (4)$$

où n_{Kevlar} est le nombre de fils de Kevlar utilisés lors de la pultrusion, A_{Kevlar} est l'aire de Kevlar dans un fil, et A_C est l'air total du filament pultrudé. Il est à noter que A_C est considéré comme étant l'aire de sortie d'une filière donnée. Les aires de sortie des filières sont listées au Tableau 3.1.

L'aire des fils est calculée selon leur masse linéique (μ_{fil}), fournie par le manufacturier, divisé par la densité du matériau (ρ_{fil}), tel que :

$$A_{fil} = \frac{\mu_{fil}}{\rho_{fil}} \quad (5)$$

L'équation 4 est valide pour Kevlar et le TPU en remplaçant l'indice fil par Kevlar ou TPU. Pour les fils utilisés dans cette étude, A_{Kevlar} est de 0,046 mm², et A_{TPU} est de 0,030 mm².

Un ratio de remplissage (R_R) des filières peuvent être calculées par :

$$R_R = \frac{A_{matière,in}}{\frac{\pi}{4} D_{SC}^2} \quad (6)$$

où $A_{matière,in}$ est l'aire de la matière à l'entrée de la filière divisée par l'aire de sortie de la filière.

Le Tableau 3.1 décrit les dimensions de sortie, les v_f et les taux de remplissage de pour chaque filière de chauffage afin de produire un fil de 1mm de diamètre. La matière première de pultrusion est assemblée avec 10 fils de Kevlar et 14 fils de TPU. Ainsi, le v_f théorique des filières calculé avec l'équation (4) commence à 37,4%, pour s'établir à 58,9% pour le filament à muscle pultrudé obtenu à la sortie de la filière 8. Le R_R , calculé avec l'équation (6), commence à 73% dans la filière 1. Pour les autres filières, $A_{matière,in}$ est assumée égale à l'aire de sortie de sa filière précédente. Le Tableau 3.1 montre que R_R est inférieure à 100% dans les filières 1 à 3 et augmente progressivement jusqu'à ce qu'il dépasse 100% dans le reste des filières. Comme vu au Chapitre 2, un R_R supérieur à 100% produit un écoulement de refoulement qui favorise l'imprégnation du composite.

Tableau 3.1 : D_{SC} , v_f et R_R pour les huit filières utilisées pour produire le filament à muscle

No.	1	2	3	4	5	6	7	8
D_{SC} (mm)	1,27	1,168	1,092	1,067	1,054	1,041	1,029	1,016
v_f	37,4%	44,5%	51,3%	53,7%	54,9%	56,2%	57,5%	58,9%
R_R	73%	86%	99%	103%	102%	102%	102%	103%

Les 3 premières filières agissent comme stage de préchauffe et d'alignement de la matière première, leurs dimensions sont donc sélectionnées afin de graduellement regrouper les fils de matières premières sans appliqué de compression associée à un R_R supérieur à 100%. La dimension de la dernière filière de préchauffe est fixé le plus près d'un R_R de 100% afin de compléter l'alignement des fils pour les filières de chauffage à venir. Plus le R_R est élevé, plus la matière première est exposée à une forte compression et nécessite donc une plus grande force de traction afin de la faire progresser à travers les filières [18]. Afin de limiter la force de traction nécessaire et d'éviter une compression excessive dans une filière particulière, le travail de compression est distribué de manière uniforme entre les 5 filières de chauffage. Elles possèdent donc toutes un R_R entre 102% et 103%. Pour obtenir un filament de 1 mm de diamètre, la dimension de la filière finale est fixée à 1,016 mm afin de compenser pour la rétraction du polymère lors du refroidissement selon les recommandations du fournisseur.

La matière première pour la pultrusion a été préparée selon deux méthodes distinctes : les fils co-enroulés et les fils assemblés par torsion. Pour la méthode à fils co-enroulés, un fil de Kevlar et un de TPU sont enroulés simultanément sur une bobine intermédiaire sur une longueur de 20 m. La bobine possédant 20 m de matière est ensuite installée à son tour sur le cantre. L'extrémité libre du fil enroulé sur la bobine est fixée à une seconde bobine et 10 mètres de matière sont transférés à cette dernière. La Figure 3.4 montre le résultat de ce processus, une paire de fils Kevlar/TPU de 20 mètres dont les deux extrémités sont stockées sur des bobines.

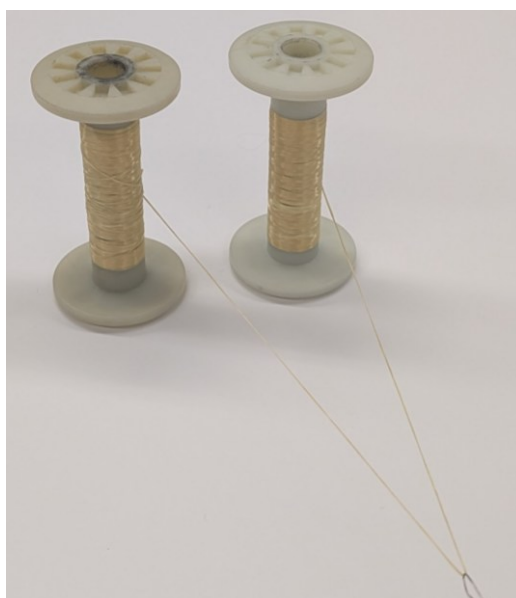


Figure 3.4 : Paire de fils Kev/TPU dont les deux extrémités sont enroulées

La traction des fils par leur point milieu permet de lancer le processus de pultrusion en utilisant la technique de pultrusion en lot [28]. Cette manœuvre est répétée à cinq reprises, pour obtenir cinq paires de bobines (10 bobines). Pour deux des paires de bobines, le nombre de fils de TPU utilisé est doublé. La pultrusion est donc réalisée avec 10 fils de Kevlar et 14 fils de TPU.

La Figure 3.5 décrit la structure échelonnée présente dans la matière première préparée suivant la méthode des fils assemblés par torsion. Cette méthode forme un faisceau unique contenant l'entière des fils de matière première pour la pultrusion. Deux types de torsion sont retrouvés dans le faisceau, une « micro-torsion » formée des paires de fils de Kevlar et TPU tordus ainsi qu'une « macro-torsion » formée de l'ensemble de la matière première.

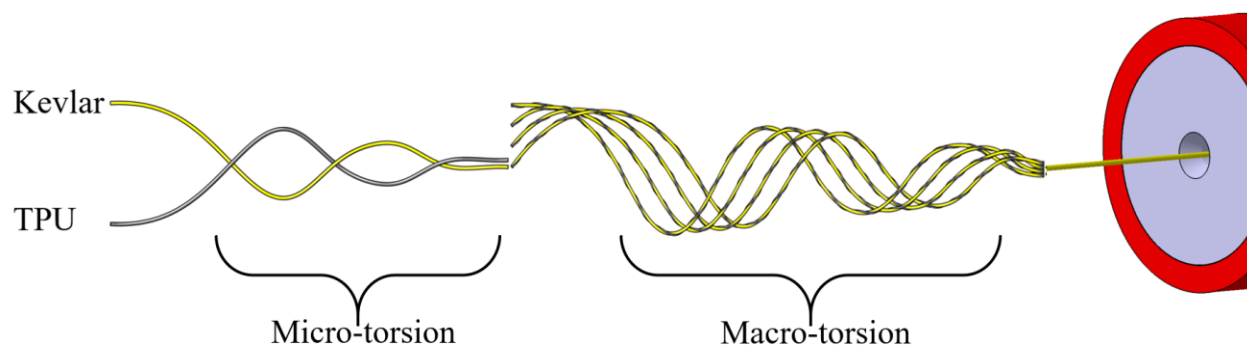


Figure 3.5 : Composition de la matière première préparée avec la méthode des fils spiralés

Un fil de Kevlar et un fil de TPU sont déroulés sur une distance de 10 m puis torsadés à 20 tours par mètre (TPM) pour créer des paires. Cinq de ces paires sont ensuite étendues et deux fils de TPU supplémentaires sont aussi placés à côté. Le faisceau de fils résultant est plié à son point milieu afin de doubler le nombre de fils à 10 Kevlars et 14 TPU et de permettre le lancement du processus de pultrusion à l'aide de la technique de pultrusion en lot. Le faisceau plié formé est torsadé jusqu'à ce que le nombre de TPM résulte en l'angle de torsion désiré. L'angle de torsion α est représenté à la Figure 3.6.

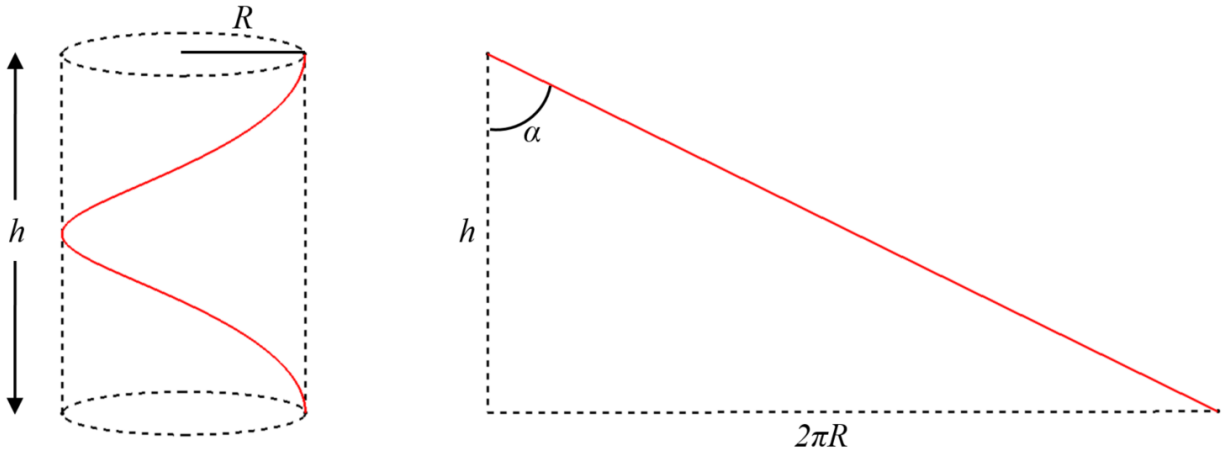


Figure 3.6 : Représentation de l'angle de torsion α pour un pas de torsade h .

La Figure 3.6 montre un cylindre de fils groupés et torsadés de rayon R avec une fibre externe spiralee. Le pas de la spirale est h . En dépliant la spirale, on obtient un triangle rectangle dont la hauteur est h et la base est la circonférence du cylindre de fils groupés. L'angle de torsion de la fibre externe α est l'angle entre l'hypoténuse et la hauteur du triangle déplié de la spirale. L'inverse de h , mesuré en mètres, donne le nombre de tours par mètres (TPM) des fibres. Lors de la préparation de matière première avec la méthode des fils torsadés, le nombre de tours par mètres (TPM) pour obtenir l'angle de torsion prépultrusion ($\alpha_{pré}$) est obtenu par :

$$TPM = \frac{\tan(\alpha_{pré})}{2\pi R}. \quad (7)$$

Cependant, lors d'expériences préliminaires de pultrusion variant le TPM initial du précurseur, il a été observé que l'angle de torsion diminue dû à l'étirement lors de la consolidation de la matière première en un filament pultrudé de 1mm de diamètre. Le ratio entre $\alpha_{pré}$ et l'angle de torsion post-pultrusion α_{post} a été caractérisé lors d'une série d'expériences préliminaires pour les angles de torsion sous 30° afin d'obtenir un facteur de compensation de 1,333. Ce facteur est uniquement valide pour les dimensions de filières ainsi que les matériaux utilisés. Il est nécessaire de recaractériser le facteur de compensation si l'équipement ou la matière est changé lors d'expériences futures. Ainsi, pour un angle de torsion α_{post} désiré, il est possible d'obtenir la valeur $\alpha_{pré}$ en multipliant par 1,333 et d'ensuite obtenir le TPM nécessaire pour préparer la matière première torsadée à l'aide de l'équation (7). Ces calculs utilisent le R du filament pultrudé. Le Tableau 3.2 montre les valeurs de torsion ainsi que les angles de torsion compensés pour obtenir les précurseurs tordus nécessaires à la production de filaments pultrudés possédant les angles de torsion 5° , 10° , 15° et 20° .

Tableau 3.2 : Détermination de la torsion des précurseurs

$\alpha_{post} (^\circ)$	5	10	15	20
$\alpha_{pré} (^\circ)$	6,50	13,00	19,50	26,00
TPM (Tr/m)	36,3	73,5	112,7	155,3

La compensation de l'étirement du faisceau de matière rencontré lors de la pultrusion mène à de nouvelles valeurs cibles pour leur angle de torsion avant pultrusion. Un angle post-pultrusion de 5° est compensé à $6,50^\circ$, 10° à $13,00^\circ$, 15° à $19,50^\circ$ et 20° à $26,00^\circ$. Les TPM résultants sont donc de 36,3, 73,5, 112,7 et 155,3 pour obtenir les filaments d'angles de torsion de 5° , 10° , 15° et 20° respectivement.

Le nombre de TPM nécessaire pour atteindre les valeurs calculées est appliqué aux précurseurs à l'aide d'une machine à torsion électronique spécialement conçue équipée d'un moteur à encodeur ainsi que d'une pince. Une extrémité du précurseur est fixée en place et la seconde est installée dans la pince rotative du système. La longueur du précurseur est mesurée et multipliée par le nombre de TPM visé. Cette valeur est entrée dans la machine à torsion et cette dernière effectue le nombre de tours nécessaire. Le faisceau final torsadé est enroulé sur une bobine. Il faut noter que les v_f et R_R calculés dans le Tableau 3.1 sont valides que pour la méthode des fils co-enroulés. La torsade des fils fait que la section des fibres projetée sur la sortie des filières devient ovale et contribue à augmenter le v_f et R_R . Cependant, la valeur réelle de v_f et R_R n'a pas été calculée comme la distribution d'orientation des fibres du filament est inconnue.

3.1.4 Pultrusion des filaments à muscle

La pultrusion est réalisée en débobinant la matière première préparée par la méthode co-enroulée ou torsadée à différents angles. La tension maintenue dans les fils par le cantre est ajustée à 2N pour les cinq bobines de matière première co-enroulée droites et à 6N pour la bobine du précurseur assemblé. Chaque niveau de tension est validé à l'aide d'un tensiomètre avec une précision de $\pm 0,5$ N. Les filières de pultrusion sont chauffées aux températures de consignes listées au Tableau 3.3.

Tableau 3.3 : Température de consigne des filières pour la pultrusion du filament à muscle

Filière	1	2	3	4	5	6	7	8	Refroidissement
Température ($^\circ\text{C}$)	110	130	190	210	210	210	210	210	60

La température des premières filières augmente graduellement jusqu'à la température de procédé de 210°C. Cette température est ensuite maintenue dans les filières 4 à 8 possédant un taux de remplissage supérieur à 100%. La température de la filière de refroidissement englobant le tube à paroi mince est fixée à 60°C. Lors de travaux préliminaires, cette température de refroidissement s'est avérée produire un fini de surface acceptable tout en limitant les efforts de traction. Le système de traction entraîne les précurseurs à travers les filières à une vitesse de 75 mm/min.

La qualité de l'imprégnation des filaments pultrudés est validée par microscopie. Des échantillons de 3 cm sont prélevés à 3 points sur la longueur du fil pultrudé. Ces échantillons sont ensuite positionnés verticalement dans un contenant cylindrique de 31,75 mm de diamètre et sont enrobés de résine époxy transparente (EpoFix, Struers). Les cylindres durcis contenant les échantillons sont sablés puis polis à l'aide d'une machine de polissage automatisé (Tegramin-25, Struers) afin de rendre la surface inférieure, traversée perpendiculairement par les échantillons, propice à la capture d'image par microscope numérique (VHX7000, Keyence). Le même microscope est utilisé afin de valider la qualité du fini de surface des filaments pultrudés et leur angle de torsion. Les filaments sont allongés puis installés sur un cadre tendeur spécialement conçu, fixant les filaments à deux points avec des étaux séparés par 25 cm. L'observation de la surface des filaments pultrudés installés sur le cadre tendeur sous le microscope permet d'isoler certaines fibres de renforts clairement grâce à la faible opacité du TPU. Une ligne centrale est dessinée par point milieu sur l'épaisseur du filament et une autre à l'intersection des fibres isolées et de la ligne centrale. L'angle entre les deux lignes est mesuré afin de valider l'angle de torsion attendu des différentes configurations de précurseurs assemblés par mélange par torsion.

3.2 Résultats et discussion

3.2.1 Pultrusion

Lors d'essais préliminaires, il a été observé que les fils de TPU se coupaient lorsqu'ils étaient exposés à des températures au-dessus de 100°C dans la première filière. Cela pose problème lors de la pultrusion utilisant la matière première préparée par la méthode co-enroulée sur cinq paires de bobines séparées. Les paires de fils, initialement séparés l'un de l'autre sur le cantre, se rejoignent à l'entrée de la première filière chauffée. Les fils de TPU en périphérie entrent en contact direct avec la section de moulage chauffée et rompent sous la faible tension causée par le déroulement des bobines sur le cantre. Pour pallier ce problème, la température des premières

filières est réduite, comme montré au Tableau 3.3, afin d'éviter le sectionnement par tension à chaud des fils. Ensuite, la Figure 3.7 montre les filaments pultrudés à la sortie de la première filière avec en a) la matière première co-enroulée, et en b) celle préparée par torsion.

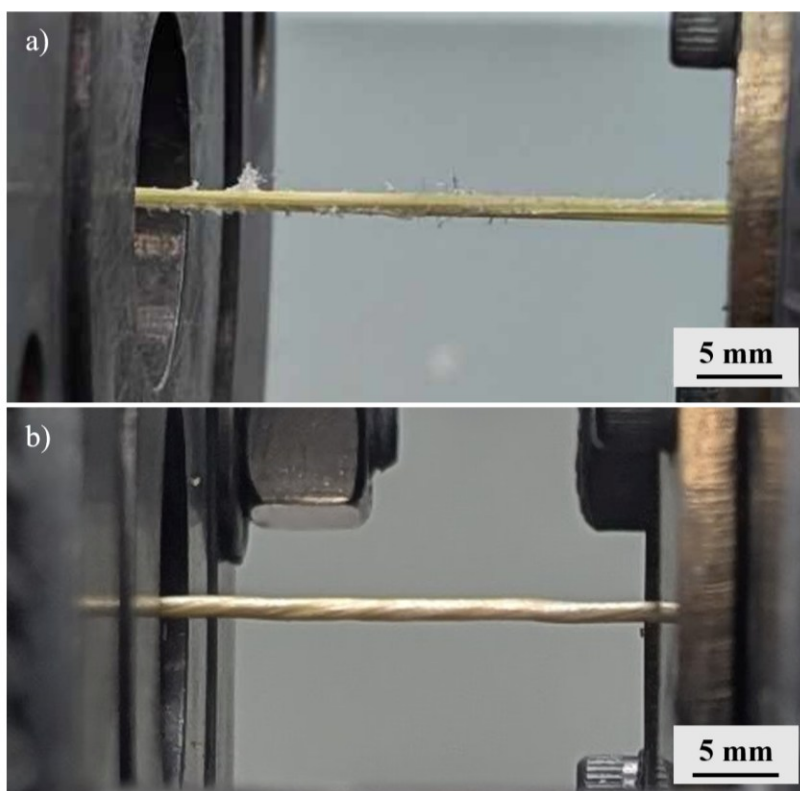


Figure 3.7 : Faisceau de matière première entre les filières 3 et 4, a) Arrachement des fils de TPU en périphérie à la sortie des filières avec la méthode de fils co-enroulés sur bobines séparées, b) Fils en périphérie intacts à la sortie des filières avec la matière première assemblée par torsion

La Figure 3.7 montre qu'avec la méthode co-enroulée, le TPU insuffisamment chauffé est arraché par la friction lors de son passage dans les sections de moulage. Les bris visibles à la Figure 3.7 s'accumulent et augmentent l'apparition de nouveaux bris jusqu'à la rupture complète des filaments de TPU avec l'avancement du processus de pultrusion. La Figure 3.7 montre qu'avec la méthode d'assemblage par torsion, le filament à la sortie de la première filière est lisse et sa surface est libre de morceaux de TPU arrachés. La matière première tordue résulte en un filament pultrudé torsadé composé de couches coaxiales de fibres de Kevlar suivant des parcours en hélices.

La matière première préparée avec la méthode de torsion resserre les fils de TPU et Kevlar ensemble, ce qui augmente la friction entre les deux. Cette friction élimine la tension dans les fils de TPU dû à l'entraînement de la bobine et évite le sectionnement par tension à chaud des fils à leur contact avec les sections de chauffage. De plus, selon Naik and Madhavan [32], la structure

de la matière première de pultrusion tordue entraîne une migration de niveau des fibres extérieures du faisceau. Cette migration assurerait qu'aucun fil de TPU ne reste en surface continuellement sur la longueur du faisceau de matière première. Cela expliquerait l'absence d'accumulation de bris par friction en surface dans les premières filières de chauffage. Des travaux de caractérisation sont nécessaires pour confirmer ce phénomène et son impact sur la qualité des filaments pultrudés.

3.2.2 Microscopie

La Figure 3.8 montre un filament pultrudé avec un α_{post} désiré de 5° . Le fini de surface montré est typique de tous les filaments pultrudés préparés par la méthode torsadée, peu importe leur α_{post} .



Figure 3.8 : Fil Kevlar/TPU torsadé pultrudé avec $\alpha_{post} = 5^\circ$

La surface des filaments ne présente pas de bris de fibres ou d'accumulation de polymère excessive. Les filaments ne présentent pas de défauts majeurs sur leur longueur entière. Une inspection visuelle des filaments ne révèle pas de sections sèches où les fibres ne sont pas imprégnées de polymère. La mesure par micromètre des filaments à intervalle régulier révèle que le diamètre varie entre 0,87 mm et 1,05 mm avec une moyenne de 9,7mm

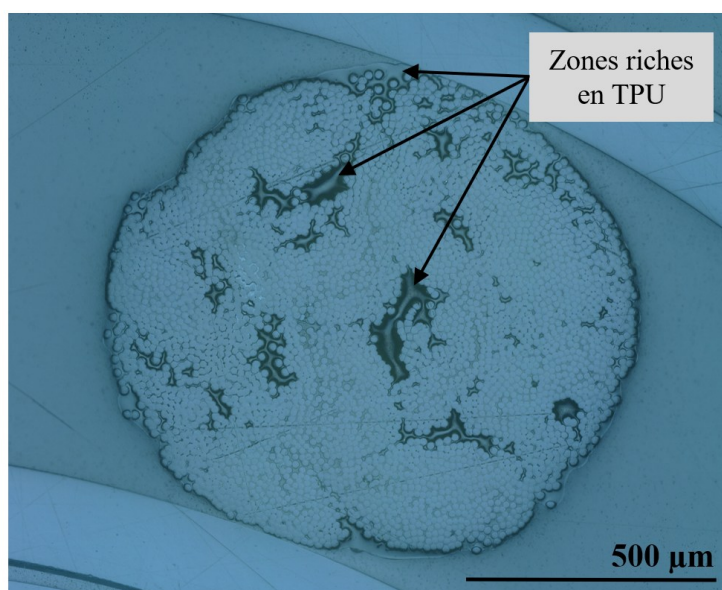


Figure 3.9 : Micrographie d'un fil Kevlar/TPU torsadé pultrudé de $\varnothing 1\text{mm}$ avec $\alpha_{post} = 5^\circ$

La Figure 3.9 montre une section typique de filament encastrée dans la résine époxy et polie vue sous le microscope numérique. Les petits cercles plus pâles sont les fibres de Kevlar réparties dans la section du filament. Le TPU est affiché en gris foncé, les sections riches en TPU se démarquent par leur couleur plus profonde à leur frontière. Les deux sections arrondies aux coins de l'image sont des fixations en plastique utilisées pour positionner les échantillons. Les micrographies révèlent la présence de zones riches en TPU au cœur du filament pultrudé. Certaines zones riches en TPU sont aussi présentes sur la surface. Elles viennent remplir les sections sans fibres et complètent la surface circulaire du filament. L'image ne montre pas de zones non imprégnées majeures. Le taux de vide des filaments pultrudés n'a pas été mesuré. L'étude des filaments par microtomodensitométrie 2D et 3D serait intéressante pour suivre le parcours exact des fibres et valider leur angle de torsion.

La Figure 3.10 montre les angles de torsion mesurés après pultrusion pour chaque configuration. La faible opacité du TPU permet d'observer les fibres de Kevlar en surface et leur angle uniforme sur la longueur du filament.

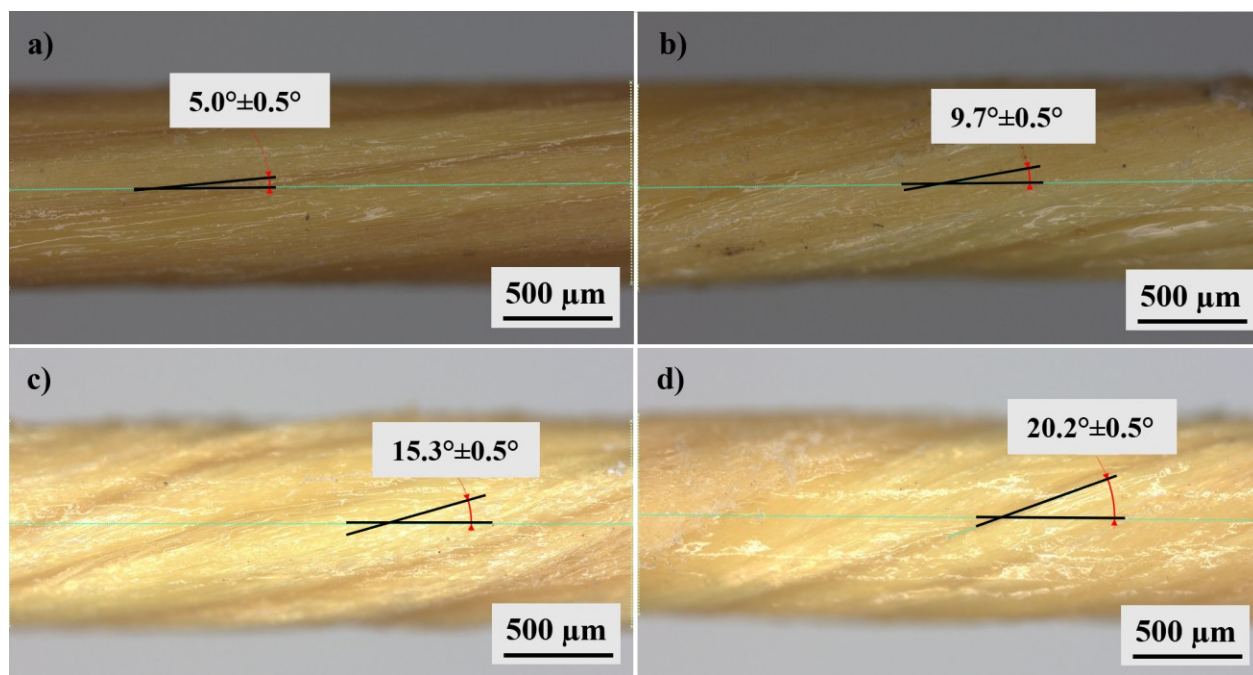


Figure 3.10 : Mesure de l'angle de torsion des configurations de précurseurs, a) 5° ciblé, b) 10° ciblé, c) 15° ciblé, d) 20° ciblé

La mesure de l'angle de torsion des différentes configurations en plusieurs points valide la valeur du facteur de compensation utilisé lors de la préparation des précurseurs. Les valeurs d'angle de torsion des filaments pultrudés possèdent une erreur de $\pm 0,5^\circ$.

3.3 Conclusion

Des sections de 5 m de filaments Kevlar/TPU de 1mm de diamètre ont été produites avec succès par pultrusion thermoplastique. Afin de procéder à l'étape de mise en forme de muscles artificiels, il est nécessaire d'avoir un filament composite libre de zones sèches pouvant causer la déconsolidation de ce dernier lors de l'ajout de torsion. L'étude des images de micrographie ainsi que l'absence d'accumulation de bris en surface des filaments pultrudés confirme que les matériaux produits sont de qualité suffisante pour être utilisé comme filament à muscle dans la fabrication de muscles artificiels spiralés. La présence de certaines zones riches en polymère est notée cependant. Différentes configurations d'angle de torsion ont été produites et la répétabilité de leur angle à travers la longueur du filament a été validée. Les filaments à muscle peuvent ainsi être produits et stockés pour en faire la mise en forme subséquente. Les filaments à muscle existants ont typiquement un diamètre dans les alentours de 0,4 mm [4]. Cependant, l'équipement de pultrusion possède présentement une limite inférieure de 1mm de diamètre. L'utilisation de filament de plus faible diamètre permet aux muscles d'atteindre un β plus important avant que les spires n'entrent en contact. Cela permet donc une plus grande contraction comme présenté à la Figure 2.7 disponible à la section 2.3 de la revue de littérature. Des travaux futurs seront nécessaires pour permettre la production de filament de plus petits diamètres.

CHAPITRE 4 Mettre en forme des muscles artificiels spiralés

Ce chapitre décrit le processus de mise en forme des filaments pultrudés Kevlar/TPU en muscles artificiels spiralés ainsi que l'équipement conçu pour faciliter la production. Les muscles résultants sont analysés pour valider et documenter leur forme ainsi que certains phénomènes observés lors de la mise en forme.

4.1 Méthode expérimentale

Le schéma de la Figure 4.1 illustre les manipulations nécessaires de méthode de mise en forme avec la technique d'introduction de twist (de l'anglais *twist insertion*) [4]. Cette technique vise à former les spirales en tordant le fil à muscle sur lui-même tout en étant maintenue sous tension.



Figure 4.1 : Schéma de mise en forme d'un muscle artificiel par « Twist insertion »

L'extrémité gauche du fil à muscle schématisé est fixée en translation, mais peut être pivotée autour de l'axe du fil. L'extrémité droite est retenue de pivoter, mais peut bouger de manière transversale dans l'axe du fil. Une tension est appliquée à l'extrémité contrainte en rotation. Lors de la torsion, cette tension permet d'éviter un enroulement désordonné des spirales sur la longueur du fil. Elle est maintenue jusqu'à la fin du processus de mise en forme et de stabilisation thermique.

La Figure 4.2 décrit le système combiné de mise en forme automatisée et d'activation thermique de muscles spiralés. Ce système spécialement conçu simplifie la mise en forme des muscles et rend le processus plus répétable comparé à une mise en forme manuelle. La Figure 4.2 a) montre l'ensemble du système à torsion de muscle est fixé sur un châssis en membrures d'aluminium et est composé de 3 sections principales : le moteur à torsion, son contrôleur ainsi que l'assemblage de poids de tension guidés. Le châssis du système de mise en forme soutient aussi les composantes additionnelles nécessaires pour l'activation thermique des muscles : le tube de chauffage instrumenté ainsi que la source d'air chaud à haut débit. Cet équipement est aussi utilisé pour la stabilisation à chaud des muscles formés.

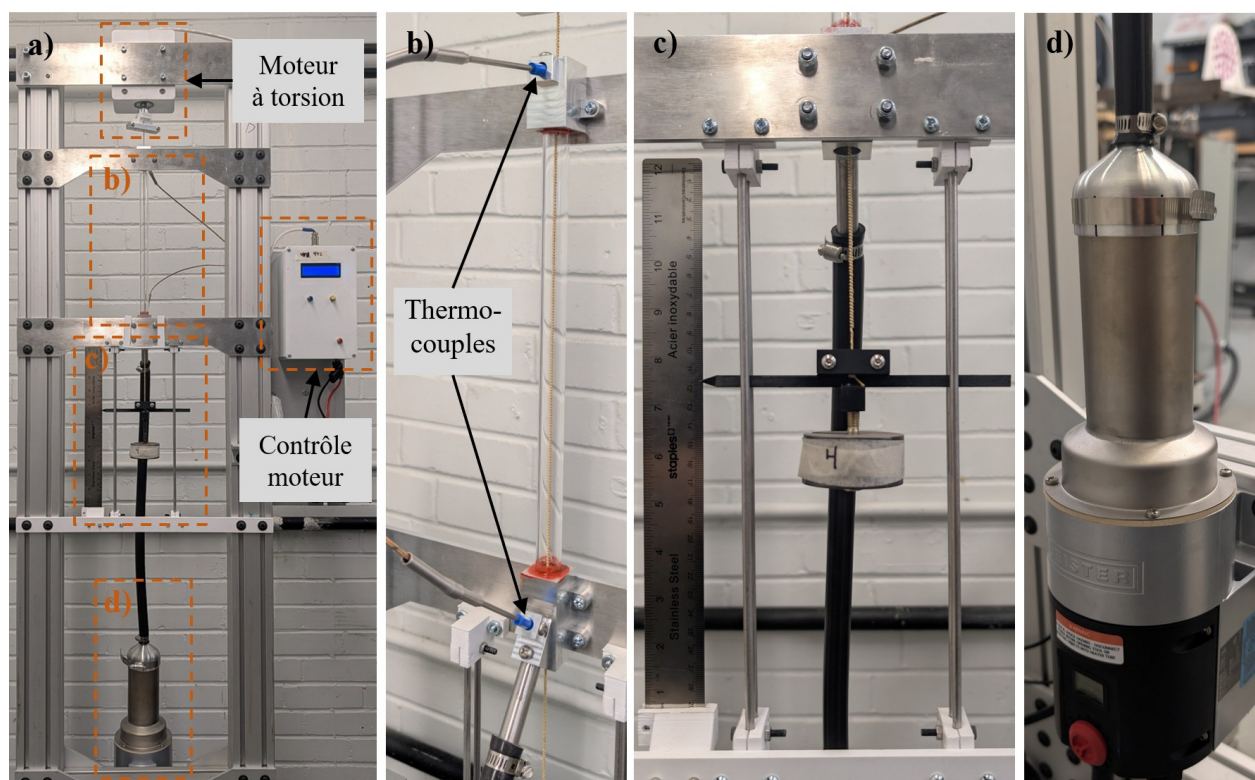


Figure 4.2 : Système de mise en forme automatisé et d'activation thermique de muscles spiralés, a) châssis et composants principales pour la mise en forme par torsion, b) tube de chauffage en quartz avec thermocouples et entrée d'air inférieure, c) poids tension guidés avec pointe de mesure, d) élément chauffant à air comprimé

Le moteur à torsion restreint l'extrémité supérieure du muscle à l'aide d'un étau métallique et contrôle sa rotation. Le moteur est muni d'un encodeur afin de précisément surveiller le nombre de tours ajoutés au fil à muscle. Le contrôleur moteur affiche le nombre de tours atteint sur son écran digital et deux contrôles permettent à l'opérateur d'augmenter ou de réduire ce nombre. Le tube de chauffage, montré à la Figure 4.2 b), mesure 28 cm et consiste d'un tube de quartz équipé de deux fixations en aluminium à ses extrémités, sur lesquels des thermocouples sont fixés dans le flux d'air afin d'en mesurer la température. La température du flux d'air présent dans le tube de chauffage est calculée par la moyenne des mesures du thermocouple inférieur et supérieur. Les fixations sont ouvertes aux extrémités du tube de quartz afin de laisser le muscle passer à travers le tube sans toucher les parois. La fixation inférieure est munie d'un port laissant l'air chaud entrer dans le tube puis sortir par l'orifice supérieur. Le système de poids de tension guidé, montré à la Figure 4.2 c), est muni d'un étau afin de fixer l'extrémité du fil à muscle et permet de sélectionner la tension désirée dans ce dernier lors de la formation des spirales du muscle et lors de son

activation thermique à l'aide de poids modulaires. Deux paires de guides permettent au chariot de poids de se déplacer axialement tout en empêchant sa rotation. L'amplitude de l'activation du muscle est mesurée par le mouvement de la pointe du chariot de poids le long d'une règle fixée au châssis. Le flot d'air entrant par le port inférieur du tube de chauffage provient d'une source d'air comprimé à température pièce. L'alimentation en air passe par un élément chauffant résistif (LHS 61S, Leister), illustré à la Figure 4.2 d), avant d'entrer dans le tube de chauffage. L'élément chauffant possède son propre contrôleur thermique intégré à boucle fermée et peut atteindre jusqu'à 650°C.

Pour la mise en forme d'un muscle artificiel spiralé, une section de 140 cm de filament à muscle est découpée du fil Kevlar/TPU pultrudé. Une des extrémités est fixée dans l'étau du moteur de torsion et l'autre sur l'étau du chariot de poids. Le chariot est ensuite inséré dans les guides et une masse de 400 g est installée sur le chariot. Le moteur de torsion est ensuite activé par l'opérateur à l'aide du contrôleur et l'ajout de torsion au fil à muscle est initié. Durant la torsion, des spires se forment sur le filament. Afin d'assister la répartition uniforme des spires à travers le fil, l'opérateur met pause à la torsion du filament et applique une tension additionnelle en appuyant manuellement sur le chariot de poids avec une force de 15 N par courts intervalles de 1 seconde à 5 reprises. L'ajout de torsion est ensuite relancé et le processus continue jusqu'à ce que l'entièreté du fil soit recouverte de spires.

Lors de la mise en forme, l'ajout continu de torsion au filament augmente son instabilité jusqu'au point où le seuil nécessaire à la formation spontanée d'une spire est dépassé. Cependant, une fois une spire formée, il est possible de réduire la torsion dans le filament sous le seuil de formation initiale sans que cette spire ne perde sa forme. Une fois le filament entièrement couvert de spires, il est donc possible de réduire la torsion appliquée au filament sans réduire le nombre de spires présentes sur sa longueur. La Figure 4.3 montre l'effet de relaxation du muscle causé par la réduction du nombre de tours appliqués après la formation complète des spires du muscle. Une fois ce point atteint, le moteur est mis en marche arrière jusqu'à ce qu'une première spire perde sa forme, puis il est remis en marche avant suffisamment pour reformer cette spire. Cette manœuvre permet de relâcher les spires en réduisant le nombre de tours appliqués au fil à muscle. L'angle de spire β est ainsi minimisé, ce qui augmente l'espace entre chaque spire et la longueur totale du muscle.

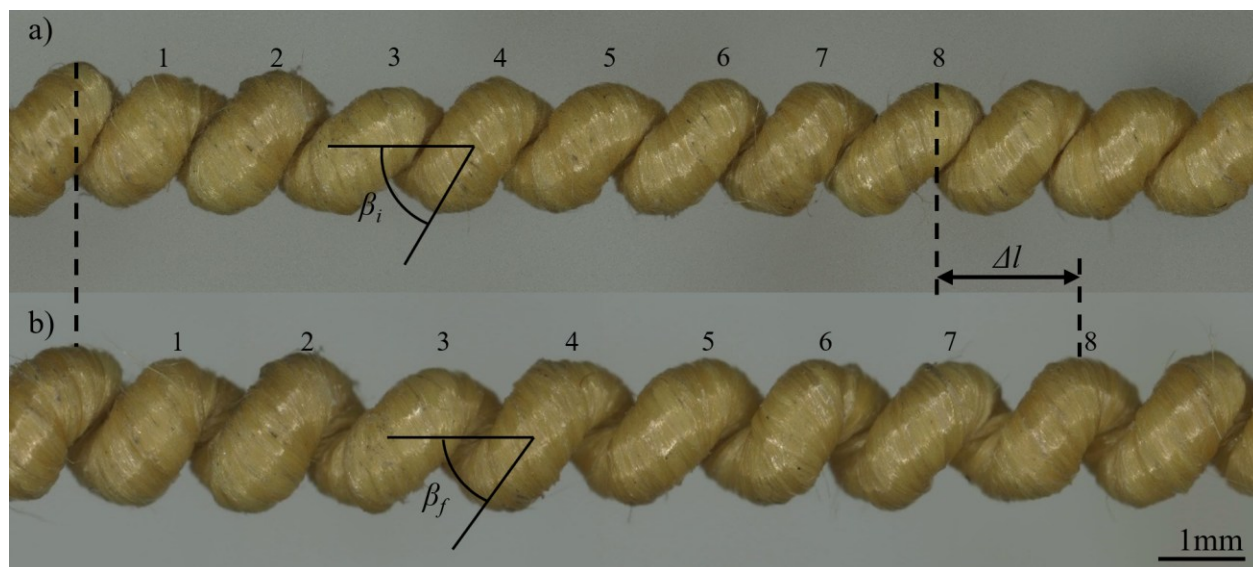


Figure 4.3 : Augmentation du pas de spire par réduction du nombre de tours ajoutés, a) avant réduction du nombre de tours, b) après réduction du nombre de tours

Lors de l'activation du muscle, les spires du muscle artificiel se resserrent jusqu'à ce qu'elles soient en contact direct ensemble. Ce contact agit comme limite mécanique de l'amplitude de contraction du muscle artificiel. L'espace additionnel entre les spires crée par la manœuvre de réduction du nombre de tours augmente la distance de contraction disponible au muscle sans réduire le nombre de spires.

La progression de la mise en forme des muscles artificiels est caractérisée par microscopie à différents moments du processus de formation du muscle. Pour ce faire, le processus de formation est arrêté et un cadre tendeur équipé de mors fige le muscle en formation en serrant les mors sur le muscle. La tension et la torsion présente dans le muscle sont ainsi conservées. Le muscle est alors extrait du système de mise en forme. Le muscle est ensuite observé sous microscope (VHX7000, Keyence) afin de noter l'apparition de défauts, l'évolution de son angle de torsion ainsi que la croissance des spires.

La Figure 4.4 montre le moule d'enrobage à fond amovible ainsi que les étapes d'assemblage nécessaires pour observer la structure interne à travers la longueur du fil lors de la mise en forme. Le moule consiste en une partie supérieure cylindrique et une surface inférieure amovible étant reliées à l'aide de boulons et écrous. L'interface entre les deux sections est scellée à l'aide de deux joints silicone, en rouge sur la Figure 4.4.

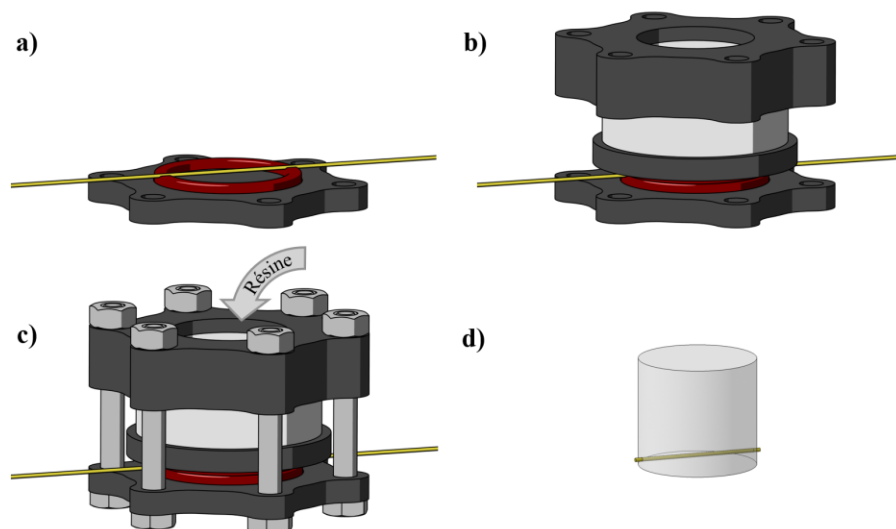


Figure 4.4 : Préparation d'un échantillon de fil horizontal pour microscopie, a) Installation du fil sur le fond amovible, b) Ajout de la section cylindre supérieure, c) Installation des boulons-écrous et enrobage de l'échantillon, d) Échantillon horizontal enrobé

À la Figure 4.4 a), le fil fixé sur le cadre tendeur est déposé sur le fond amovible du moule, puis la section cylindrique est ajoutée par-dessus à la Figure 4.4 b). Le cylindre supérieur possède un diamètre de 31.75mm et est produit en Polyéthylène à ultra-haut poids moléculaire afin de limiter l'adhésion de la résine sur les parois lors de l'extraction de l'échantillon enrobé. Les joints de silicone flexible assurent que le profil du fil est bien scellé pour éviter les fuites de résine d'enrobage. À la Figure 4.4 c), les deux sections du moule d'enrobage sont jointes à l'aide de boulons et écrous, puis la résine d'enrobage (EpoFix, Struers) est versée. La Figure 4.4 d) montre l'échantillon de fil horizontal résultant. La surface inférieure de l'échantillon est sablée jusqu'à ce que le cœur du fil soit exposé. La surface dévoilée est polie à l'aide d'une machine de polissage automatisé (Tegramin-25, Struers) afin de la rendre propice à la capture d'image par microscope numérique (VHX7000, Keyence).

Suite à la mise en forme des spires d'un muscle artificiel, il est nécessaire de verrouiller la forme atteinte afin de pouvoir manipuler le muscle en dehors de l'appareil de mise en forme. Lors de tests de chauffage préliminaires où des muscles sous tension étaient exposés à des températures graduellement plus élevées, une perte de la contraction atteinte du chauffage a été observée au-delà de 110°C. La fixation de la forme du muscle est donc réalisée en chauffant le muscle à 100°C pendant 30 minutes tout en maintenant le nombre de tours du fil à muscle ainsi que la tension appliquée sur ce dernier lors de la mise en forme des spires. La Figure 4.5 montre l'impact de la stabilisation à chaud sur la forme du muscle une fois la tension et la restriction de rotation retirées.



Figure 4.5 : Muscles artificiels au repos, a) sans stabilisation, b) avec stabilisation

Un muscle n'ayant pas été exposé au cycle de stabilisation, comme à la Figure 4.5 a), perd complètement sa forme une fois relâchée. Le nombre de tours du fil à muscle diminue et plusieurs spires disparaissent. Cependant, après le processus de stabilisation, les muscles spiralés peuvent être retirés du système de tension sans perdre leur forme, comme montré à la Figure 4.5 b). Les muscles formés peuvent ainsi être stockés pour être utilisés à une date ultérieure.

4.2 Résultats et discussion

4.2.1 Progression de la mise en forme

La Figure 4.6 décrit l'évolution de la mise en forme des muscles artificiels par la technique de *twist insertion*. Le processus de mise en forme des muscles artificiels spiralés peut être divisé en deux phases principales. La première phase de torsion, décrite par les points 1 et 2 de la Figure 4.6, augmente graduellement l'angle de torsion du fil à muscle jusqu'à ce que ce point critique soit atteint. Ce point critique est marqué par le début de la formation des spires. L'étape 3 de la Figure 4.6 montre une première spire formée sur la partie haute du filament torsadé. La seconde phase de la mise en forme, montrée aux points 4 et 5, est alors amorcée pour former la structure spiralée des muscles. Lors de la mise en forme, la torsion est ajoutée au rythme de 150 tours par minute.

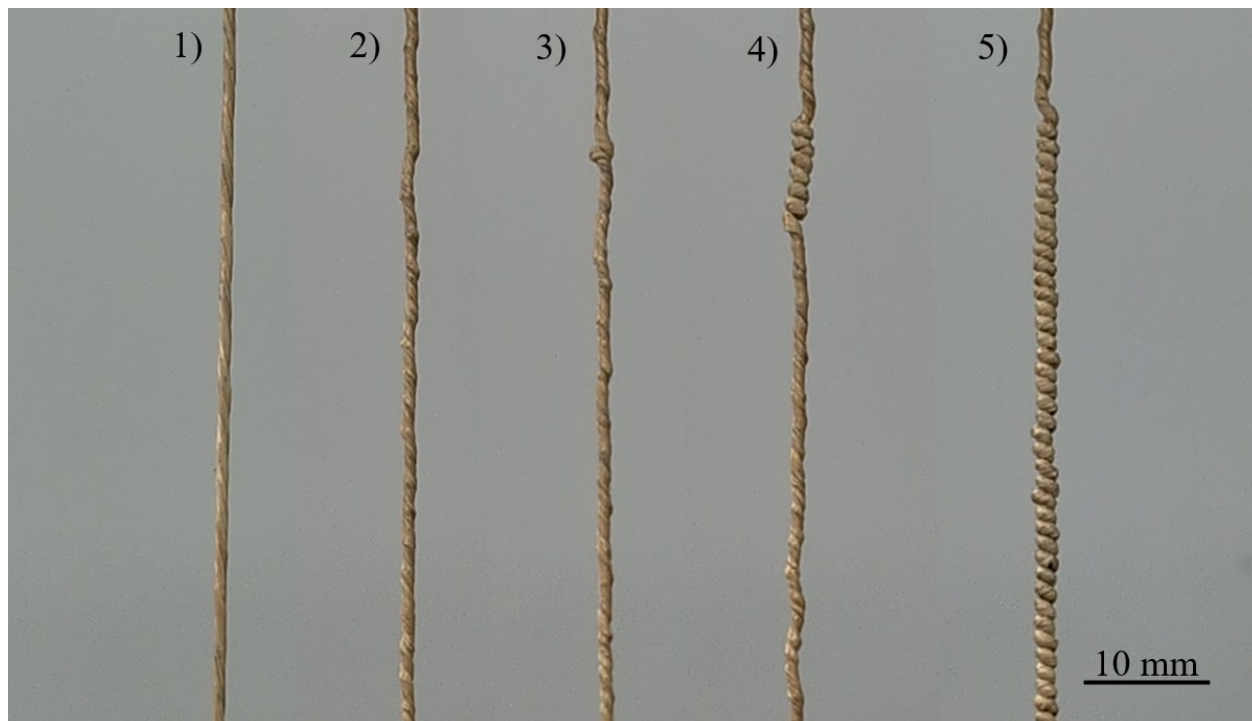


Figure 4.6 : Évolution de la mise en forme de muscle artificiel spiralé par « Twist insertion », 1) Filament à muscle sous tension, 2) Torsion ajoutée au filament, 3) Formation de la première spire, 4) Croissance du nombre de spires, 5) Filament entièrement couvert de spires

À l'étape 1 de la Figure 4.6, le filament à muscle est tendu sans torsion ajoutée, il conserve son angle de torsion initial. Le processus de torsion est amorcé au point 2, le filament reste droit, mais son angle de torsion augmente. Cet angle continue d'augmenter avec les tours ajoutés, jusqu'à ce que l'angle de torsion atteigne son point maximal et que la première spire soit formée, comme il est illustré au point 3. Le point 4 montre le nombre de spires croissant formé par les tours subséquents alors que l'angle de torsion reste le même. Le processus se poursuit jusqu'à ce que l'entièreté du fil soit couverte de spires et qu'il forme une spirale continue comme au point 5. Le filament torsadé résultant est considérablement plus court suite au processus de mise en forme.

4.2.2 Nodules

La Figure 4.7 montre les nodules qui apparaissent sur le filament lors de la mise en forme des muscles. Lors de la première phase de la mise en forme des muscles artificiels, où l'angle de torsion du filament à muscle augmente sans déclencher la formation des premières spires, l'apparition de nodules est observée sur le filament à muscle. Ces nodules sont caractérisés par une augmentation du diamètre du fil à muscle sur une distance équivalente à leur diamètre. Ces nodules ont donc une forme sphérique, et apparaissent à intervalle régulier sur toute la longueur du filament à muscle.

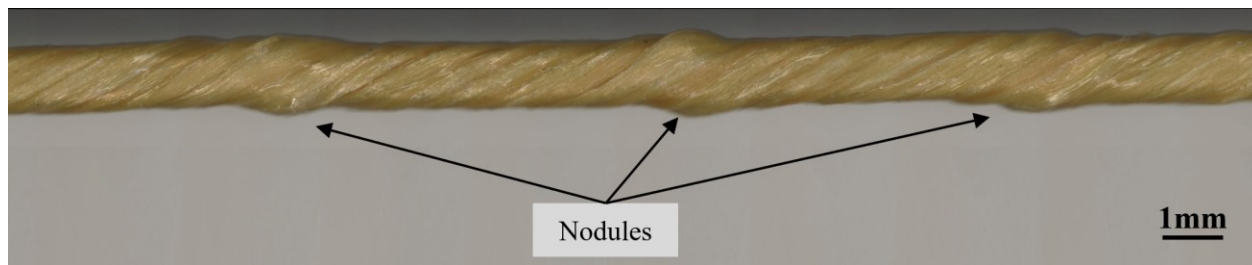


Figure 4.7 : Nodules en formation à intervalle régulier sur la longueur du fil à muscle

Les nodules ne sont pas présents sur le fil à muscle initialement, mais elles deviennent graduellement plus définies avec la progression de la mise en forme. Leur croissance cesse lorsque l'angle maximal de torsion du fil est atteint à la formation des spires.

La Figure 4.8 montre une vue de coupe des nodules réalisée par polissage axial graduel d'échantillons de filaments à muscle encapsulés dans la résine époxy et dévoile l'accumulation de fibres au cœur de ces dernières. L'intérieur des nodules observés sur la longueur du fil tordu est composé de fibres de renforts en flambement déviant de leur trajectoire régulière. Le fort flambement forme des plis de fibres avec des orientations quasi radiales en certains points, concentrés sur de courtes zones. Les fibres désorientées causent une augmentation locale du volume du cœur du fil et entraînent un gonflement des couches extérieures. Cependant, il semble que les fibres sur les couches extérieures maintiennent leur alignement et leur angle de torsion. Les fibres intérieures en amont et aval des plis maintiennent aussi leur alignement avec les fibres extérieures. Les déformations sont donc réunies sur de courtes zones, ce qui donne la forme sphérique des nodules observées à l'extérieur du filament à muscle.

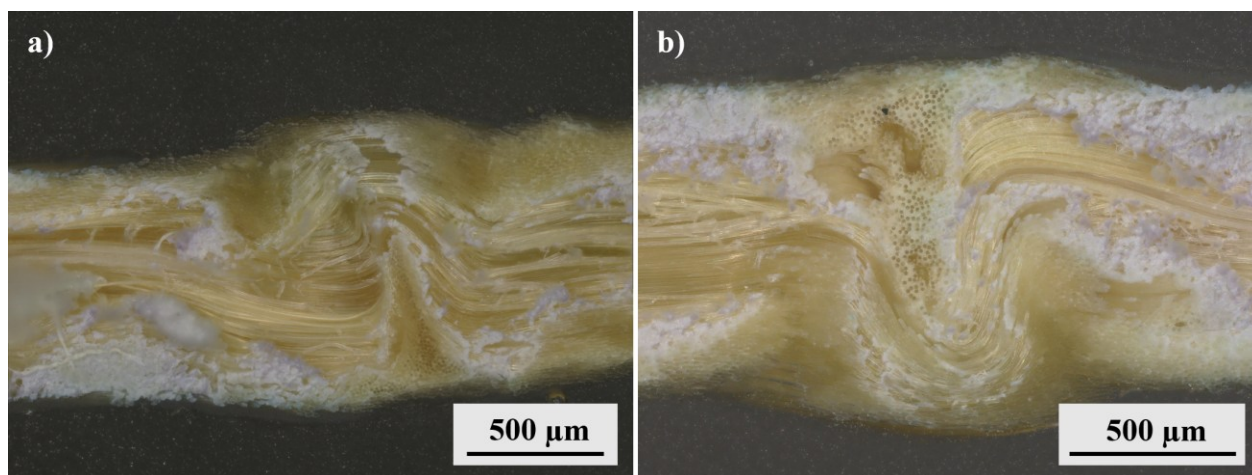


Figure 4.8 : Coupe transversale de deux nodules apparaissant sur le fil

L'étude des images par microscopie des coupes transversales de nodules n'a pas révélé de bris de fibres potentiellement causés par le fort flambement des fibres internes. Des études plus poussées des nodules en utilisant l'imagerie par microtomodensitométrie sont nécessaires pour valider l'absence de bris de fibres. L'apparition du flambement local des fibres intérieures causant les nodules peut être expliquée par l'augmentation l'angle de torsion des filaments consolidés. La Figure 4.9 montre l'évolution de la longueur du parcours de deux fibres, l'une en couche extérieure et l'autre en couche interne, d'une section idéalisée d'un fil tordu subissant une augmentation de son angle de torsion.

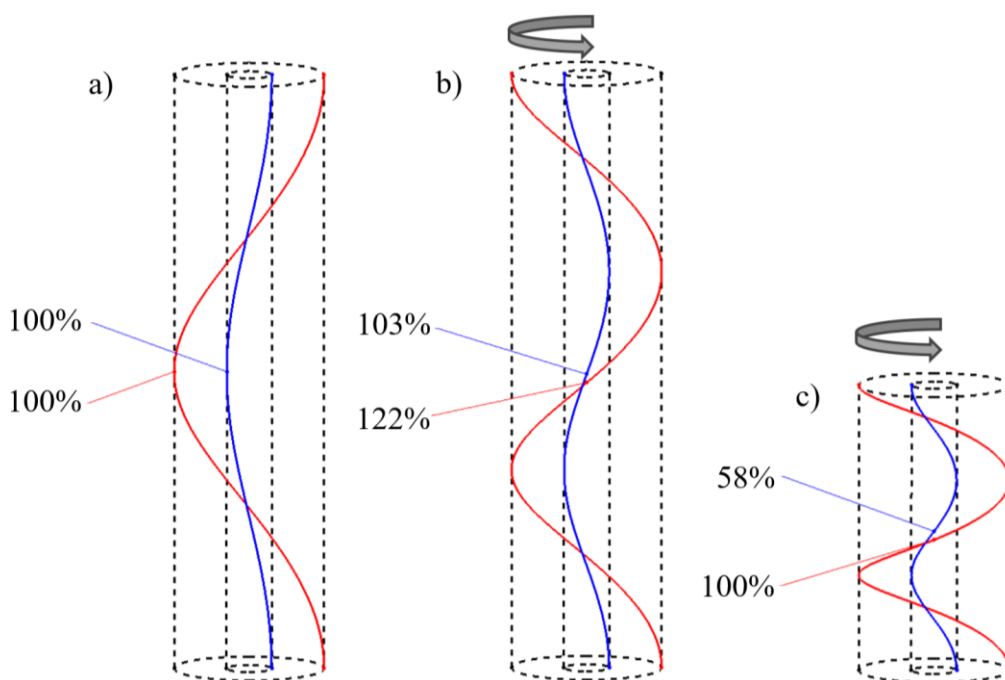


Figure 4.9 : Parcours des fibres d'une section de fil tordu, a) sans torsion ajoutée, b) torsion ajoutée, non compensée, c) torsion, longueur compensée

La Figure 4.9 a) montre la section de fil tordu hypothétique au repos, les fibres interne et externe sont donc à 100% de leur longueur initiale. La Figure 4.9 b) montre l'impact de l'ajout d'un demi-tour au fil tordu sur le parcours des fibres, sans changement à sa longueur. La longueur du parcours extérieur augmente de 22% alors que celle du parcours intérieur augmente de 3%. La situation montrée en Figure 4.9 b) ne peut exister, car les fibres de renforts ne peuvent pas être allongées dû à leur rigidité. Ainsi, la longueur de la section tordue doit donc être compensée afin d'éviter l'étirement des fibres de renfort. La Figure 4.9 c) illustre cet état compensé. La longueur de la section tordue est réduite jusqu'à ce que les parcours pour les fibres internes et externes ne dépassent pas ceux de l'état repos. La fibre extérieure dicte donc la longueur maximale, étant la

plus allongée dû à son rayon de torsade plus élevé. L'état compensé redonnant sa longueur initiale à la fibre extérieure, la fibre intérieure est raccourcie à 58% de son état initial. Ce phénomène, similaire à celui étudié par Naik and Madhavan [32] décrit à la Figure 2.3 de la revue de littérature, explique l'apparition des nodules lors de la mise en forme. Les fibres internes sont soumises à des efforts de compression par le raccourcissement du filament, ce qui mène à leur flambement. La compression des fibres du noyau mène à la formation de replis locaux par flambement, qui accumule la longueur excédentaire des fibres sur les zones adjacentes. Le flambement localisé observé est plus important que les microflambements décrits à la Figure 2.3. Ces replis sont la source des nodules périodiques sur le fil. L'augmentation continue de l'angle de torsion en surface amplifie graduellement ces replis et mène à l'augmentation du volume des nodules. Plus de travaux sont nécessaires pour étudier la progression de la formation des nodules lors de l'ajout de torsion sur le filament ainsi que leur impact local sur l'angle de torsion.

4.2.3 Morphologie du muscle spiralé Kev/TPU

La Figure 4.10 montre un muscle artificiel spiralé produit avec un fil composite Kevlar/TPU pultrudé de 1mm de diamètre avec un angle de torsion de 15°. L'appellation « Muscle 15° » est utilisée pour faire référence à l'angle de torsion du filament à muscle utilisé pour sa mise en forme. Les muscles produits forment un ressort dont le diamètre du filament est supérieur au diamètre des spires. L'indice de ressort, décrit à la Figure 2.6 et calculé selon l'équation (1), des muscles produits est donc inférieur à 1 avec une moyenne de 0,57.



Figure 4.10 : Muscle artificiel spiralé 15° Kevlar/TPU sous tension dans le tube de chauffage à température pièce

Les spires du muscle produit semblent avoir une répartition uniforme et ce dernier ne présente pas de boucles secondaires. Ces boucles sont caractérisées par un repli spontané du muscle du muscle sur lui-même [4]. Lors de la mise en forme, la formation des spires du muscle réduit la longueur du filament en moyenne de 67%. Il est donc important de préparer un filament initial suffisamment long afin de compenser à la forte réduction de sa longueur une fois formée en muscle. Les muscles comptent en moyenne $5,6 \pm 0,3$ spires par centimètres. Cette valeur varie selon leur configuration et des travaux additionnels sont nécessaires pour étudier l'impact de l'angle de torsion du filament sur la forme du muscle produit. Les nodules sont encore présents sur le filament. Les premiers 22% de la réduction de longueur du fil se produisent avant l'apparition des premières spires. Cette réduction de longueur mène donc à une augmentation de 24% du diamètre du fil de 1mm en moyenne. Lors de la stabilisation à chaud sous tension des muscles, la longueur de ces derniers augmente en moyenne de 9,2%.

4.3 Conclusion

Des muscles artificiels spiralés ont été produits avec succès en faisant usage de la méthode de mise en forme d'insertion de spires par torsion. Ils sont composés de spires uniformes et ordonnées sur toute la longueur du filament. La forme des muscles a aussi été figée grâce à une stabilisation thermique de 30 minutes à 100°C. Les muscles sont ainsi retirés du système de mise en forme sans perdre leur torsion, ce qui causerait la perte de spires par déroulement. Les muscles peuvent donc être produits puis mis de côté pour être étudiés à une date ultérieure. L'état stable des muscles en dehors du système de mise en forme ouvre aussi l'opportunité de rassembler plusieurs muscles préfabriqués en un groupe commun afin d'être thermiquement activés en parallèle dans le cadre d'applications futures.

CHAPITRE 5 Activer les muscles artificiels

Suite à la mise en forme de muscles artificiels spiralés basés sur des filaments en composite TP élastomère, leur capacité à être activé par variation thermique, ainsi que leur contraction sont étudiées.

5.1 Méthode expérimentale

Lors de l'activation d'un muscle spiralé, l'opérateur installe le muscle dans les étaux du système de mise en forme et installe les masses nécessaires pour atteindre la tension souhaitée sur le chariot de poids. L'écoulement d'air dans le tube est ensuite activé au débit le plus élevé qui ne crée pas d'oscillation ou mouvement dans le muscle tendu. L'élément chauffant est activé et sa température de consigne est graduellement augmentée afin d'éviter le dépassement de la valeur souhaité lors d'une montée abrupte de la température. L'augmentation de la température de l'écoulement d'air dans le tube de chauffage débute l'activation du muscle. La température maximale souhaitée est maintenue 20 secondes une fois atteinte afin d'assurer que le muscle atteint son amplitude d'activation complète. Le refroidissement est accompli en désactivant l'élément chauffant tout en maintenant le flot d'air comprimé. Le refroidissement se fait graduellement dû à l'inertie thermique du système de chauffage. Le muscle est ainsi refroidi jusqu'à température pièce et reprend sa forme initiale. Le temps de montée de la température a été fixé à 90 secondes lors de tests préliminaires afin d'éviter le dépassement de la température visé tout en minimisant la durée des tests. Les tests préliminaires ont aussi révélé que le refroidissement du tube de chauffage et de l'élément chauffant à température pièce nécessite le maintien du flot d'air pendant 130 secondes. La durée de chaque cycle d'activation est donc fixée à 4 minutes. Chaque muscle testé subi un minimum de 5 cycles d'activation. Si le muscle ne produit pas des activations stables et répétées après les 5 premiers cycles, les cycles de chauffage sont répétés jusqu'à ce qu'elle le devienne. La répétabilité et l'évolution de sa plage d'activation du muscle peuvent ainsi être observées.

Les valeurs limites de la plage d'activation des muscles sont recueillies par une caméra fixée devant le chariot de poids et sa pointe de mesure se déplaçant sur une règle métrique. Un enregistreur de données (GL260, Graphtec) est fixé au châssis dans le cadre de la caméra afin de noter la température associée à la position de la pointe de mesure du chariot de poids.

Les tests de comparaison des muscles produits avec les différentes configurations d'angle de torsion sont effectués avec une masse de 400g installée sur le chariot de poids. Les muscles sont nommés selon l'angle de torsion du filament utilisé pour leur mise en forme. Les muscles 5°, 10°, 15° et 20° sont exposés à une variation de température de 25°C à 105°C. La position du chariot ainsi que la température associée sont capturées à la position initiale du muscle à température pièce ainsi qu'au point maximal de l'activation à la température maximale.

La Figure 5.1 montre l'amplitude d'activation d'un muscle artificiel 5° capturé par la caméra. Cette amplitude correspond à la contraction apparaissant sur la zone activée du muscle. L'image est une vue superposée des deux états stables du muscle à 25°C puis 105°C.

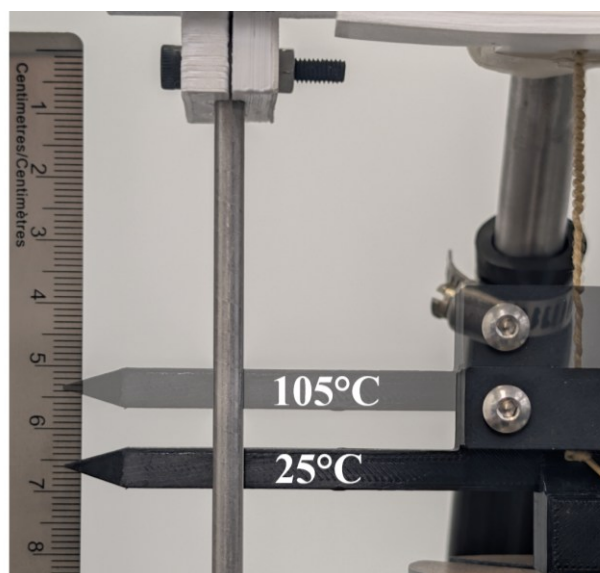


Figure 5.1 : Amplitude d'activation d'un muscle artificiel de 40 cm fait avec le filament torsadé à 5° exposé à un environnement de différentes températures

La linéarité de l'activation des muscles de 15° et 20° est aussi étudiée. Afin de recueillir les valeurs de la position du chariot de poids à travers la plage de température et non uniquement à ses extrêmes, la caméra est basculée en mode vidéo après la capture d'image de la position initiale à froid. La capture vidéo continue jusqu'à la fin du maintien de la température maximale. La procédure d'activation thermique est identique aux tests de comparaison des différentes configurations de muscle.

Le muscle fait à partir du filament torsadé à 15° est aussi testé avec différentes masses installées sur le chariot de poids. Les masses testées sont 400g, 600g, 800g ainsi que 1000g. Cette dernière correspond à la limite supérieure pouvant être installée sur le chariot. Plusieurs cycles d'activation

sont effectués pour chacune des masses installées et les valeurs de la plage d'activation sont capturées par la caméra en image au point minimal à froid (25°C) et maximal à chaud (105°C).

L'augmentation de la température de l'environnement du muscle artificiel mène à une contraction mesurable avec l'équipement développé. Le pourcentage d'actuation est calculé selon l'équation (2) avec Δl venant de l'amplitude de déplacement du chariot de poids et l_{act} de la longueur du tube de chauffage de 280 mm.

5.2 Résultats et discussion

5.2.1 Évaluation de la contraction des muscles artificiels produits

La Figure 5.2 décrit la contraction des premières actuations du muscle fait à partir du filament torsadé à 15°. La Figure 5.2 a) montre les déplacements du chariot de poids lors des premières activations. Les points jaunes décrivent la position initiale du chariot au début du cycle, les points rouges correspondent à la position maximale du chariot lors de l'activation thermique et les points bleus correspondent à la position finale du chariot une fois la température redescendue.

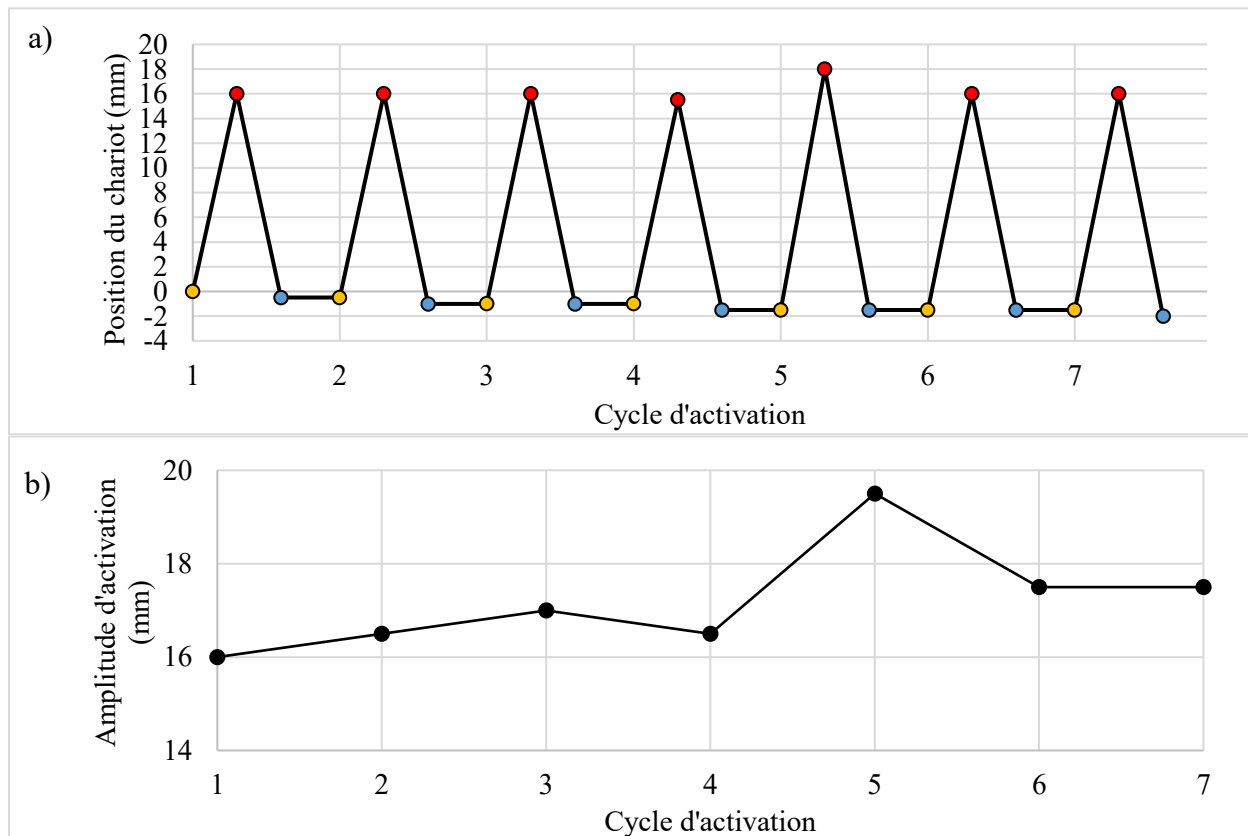


Figure 5.2 : Performance des premiers cycles d'activation thermique du muscle 15°, a) Position du chariot selon la phase d'activation, b) Amplitude d'activation des premiers cycles

L'activation thermique du muscle cause une contraction de ce dernier. Lorsque la température redescend, la contraction se relâche et le muscle reprend sa longueur initiale. L'évolution de la position du chariot de poids lors des premiers cycles d'activation, à la Figure 5.2 a) montre certains signes de dérive des positions à froid et à chaud, ainsi que sur la valeur de l'amplitude. Les quatre premiers cycles révèlent une légère relaxation du muscle au repos, sans affecter son amplitude d'activation. La Figure 5.2 b) montre l'amplitude d'activation à chaque cycle, l'amplitude commence à 16 mm et termine à 17,5 mm. La variation d'amplitude maximale est de 3,5 mm entre le premier cycle et le cinquième cycle. Cette variation est surtout expliquée par le fait qu'un contrôle précis des températures minimales et maximales des cycles était difficile étant donné que le contrôle de température est effectué à la sortie de l'élément et non au tube de chauffage. Il est donc nécessaire de surcompenser la température en sortie de l'élément pour tenir compte des pertes du système. Les premiers cycles d'activation des différentes configurations de muscle ne montrent pas de dérive importante limitant le nombre possible d'activations du muscle avant qu'il ne soit nécessaire de l'étirer pour lui redonner sa forme. Bien qu'il semble que l'amplitude d'activation soit répétable et relativement constante, plus de tests avec un contrôle de température précis, et davantage de cycles, serait nécessaire pour confirmer cette observation préliminaire.

L'amplitude d'activation répétée de chaque configuration est étudiée pour une même masse installée sur le chariot de poids. La Figure 5.3 montre la performance des muscles produits avec différentes configurations d'angle de torsion : 5°, 10°, 15° et 20°. Le pourcentage d'activation représente la réduction de longueur des muscles lors de leur activation thermique. Un pourcentage plus élevé correspond à un muscle plus performant.

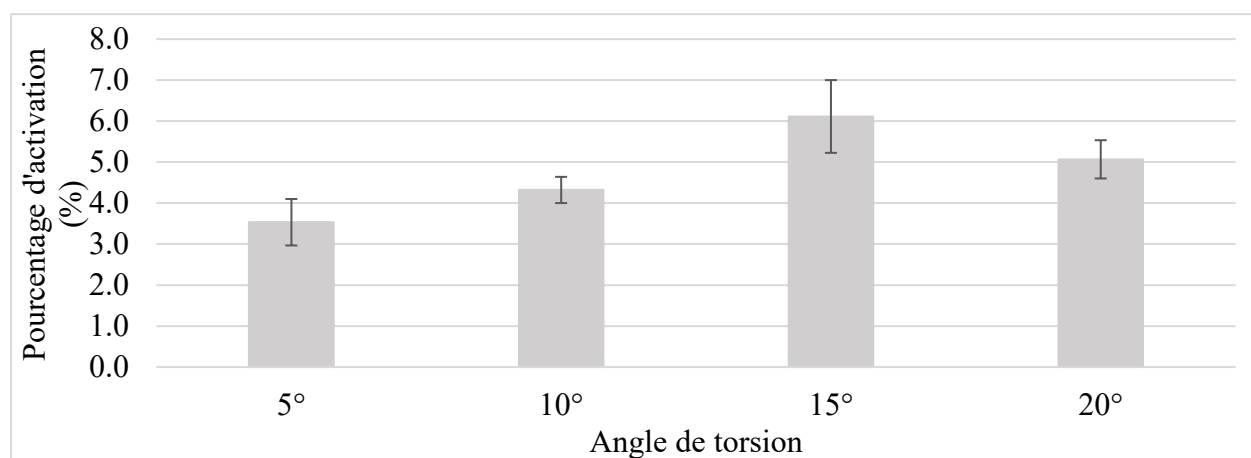


Figure 5.3 : Comparaison du pourcentage d'activation moyen sur 5 cycles d'un muscle de chaque configuration avec l'équipement de test de la Figure 4.2

La Figure 5.3 montre le pourcentage d'actuation du muscle avec le filament torsadé à 5° de $3,5\% \pm 0,6\%$, celui de 10° de $4,3\% \pm 0,3\%$, celui de 15° de $6,1\% \pm 0,9\%$, et finalement celui de 20° de $5,1\% \pm 0,5\%$. La performance des muscles augmente significativement avec l'augmentation de l'angle de torsion des filaments à muscle utilisés jusqu'à 15° . Cependant, la performance semble chuter à 20° , malgré le fait que la diminution est à l'intérieur dans les erreurs de mesures. Pour expliquer cette diminution, la Figure 5.4 montre l'évolution du taux d'activation selon la température pour les muscles de 15° et 20° .

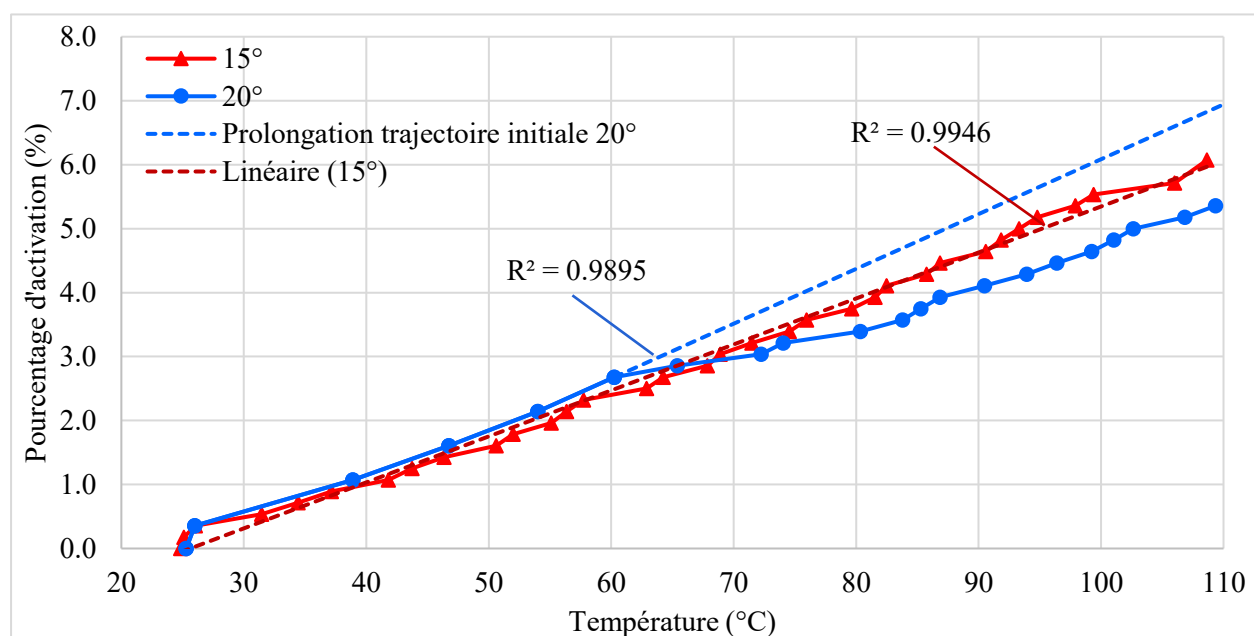


Figure 5.4 : Pourcentage d'activation des muscles de 15° et 20° selon la température de l'environnement et prolongement de la trajectoire de performance initiale du muscle 20°

La courbe du muscle 15° est linéaire avec un coefficient R de 0,9946, sur l'ensemble de la gamme de températures testées. La courbe du muscle de 20° a un coefficient R de 0,9895 entre 25°C et 60°C . Cependant, la pente du muscle 20° change à partir de 60°C . Une ligne pointillée bleue est dessinée comme prolongation de la trajectoire linéaire du muscle 20° . Entre température pièce et 65°C , pour une même température, la performance du muscle 20° , en bleu, est plus élevée que celle du muscle 15° , en rouge. Cependant, autour de 2,7% d'activation, la trajectoire d'activation du muscle 20° change. Le muscle 20° , initialement plus performant, est dépassé par le muscle 15° dont la performance reste linéaire sur toute la plage de température testée. Cette réduction de performance au-delà d'un certain niveau d'activation pour le muscle 20° est possiblement causée par les limitations géométriques du muscle. Le contact entre les spires agit comme limite

mécanique de l'activation, mais son impact augmente graduellement à l'approche du point de contact complet. L'activation thermique du muscle réduit son pas de spire et augmente son angle de spire jusqu'à l'atteinte du contact direct entre les spires. Un filament de muscle infiniment mince pourrait techniquement atteindre un angle de spire de 90° avant que ces spires n'entrent en contact, mais le diamètre du fil à muscle limite l'angle de spire maximal. Pour une même masse suspendue, le muscle 20° approche la limite mécanique d'actuation plus rapidement que le muscle 15° . Une pente d'activation plus grande est aussi visible sur les premiers degrés de l'activation pour les deux configurations. Une étude plus approfondie avec une mesure plus granulaire de l'activation ainsi qu'un système pour tester les muscles à température sous ambiante est nécessaire.

La Figure 5.5 montre les performances du muscle 15° , le plus performant parmi les configurations testées, selon la masse du chariot fixé à son extrémité libre. L'axe vertical est la position du chariot en mm. Chaque bloc dégradé de rouge à bleu indique la plage d'actuation. La limite inférieure bleue des blocs est la position du chariot lorsque le muscle est froid. La limite supérieure rouge des blocs est la position du chariot lorsque le muscle est chaud. Les pourcentages d'activation sont inscrits au-dessus de leur bande respective. L'erreur de $\pm 0,3\%$ est l'erreur sur l'amplitude calculée par propagation quadratique de l'erreur, avec une erreur absolue des mesures sur la règle de 0,5 mm.

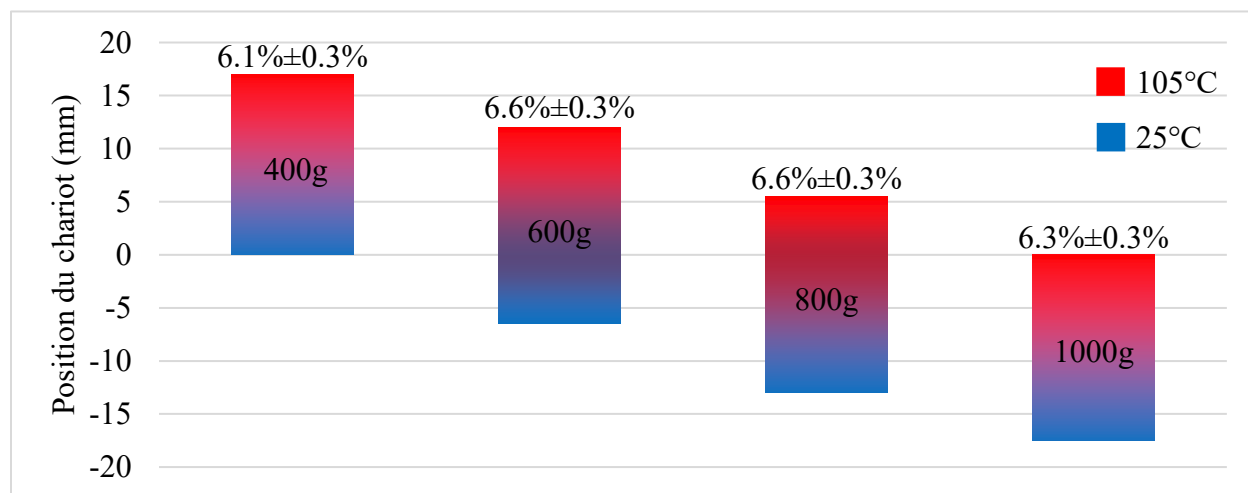


Figure 5.5 : Amplitude et pourcentage d'activation thermique du muscle 15° selon la masse du chariot de poids pour 5 cycles thermiques entre 25°C et 105°C

La Figure 5.5 montre que l'augmentation de masse du chariot de poids entraîne un décalage de sa plage d'activation. L'étirement additionnel du muscle dû à l'ajout de masse augmente le pas de spire, et ainsi abaisse la position du chariot sous la position de référence fixée avec la masse de

400 g. Cependant, l'augmentation de la masse soulevée ne diminue pas le pourcentage d'activation du muscle. En considérant l'erreur sur l'amplitude de $\pm 0,3\%$, il semble qu'elle reste constante, peu importe la masse appliquée entre 400g et 1000g. Cette activation constante, indépendante de la masse soulevée, semble unique aux muscles produits dans cette étude. L'application pour l'obtention d'un brevet sur les muscles artificiels à actuation indépendante de la charge pourrait être motivée par cette caractéristique.

5.2.2 Comparatif des performances des autres types de muscles

Le Tableau 5.1 montre les performances et caractéristiques de différents muscles artificiels possédant la même structure que les muscles Kevlar/TPU produits par pultrusion. Leur pourcentage d'activation pour une certaine masse soulevée ainsi que le travail généré servent de point de comparaison de la performance de chaque muscle. Le travail généré lors de l'activation W_{norm} est normalisé pour un muscle de longueur l_{norm} de 30 cm et est calculé selon la masse soulevée m_{act} , la constante gravitationnelle g , le pourcentage d'activation $\%_{act}$ ainsi que l_{norm} tel que :

$$W_{norm} = (m_{act} \times g) \times (\%_{act} \times l_{norm}). \quad (7)$$

Les dimensions des muscles ainsi que la plage de température utilisée pour leur activation sont aussi inscrites.

Tableau 5.1 : Différents muscles artificiels spiralés et leur performance

	Matériaux	Dimensions section transversale (μm)	Températures d'opération ($^{\circ}\text{C}$)	Masse soulevée (g)	Pourcentage d'activation (%)	Travail normalisé (J)	Réf.
1	CNTs/Paraffine	$\emptyset 115$	20 à 2560	10	7,3	0,21	[1]
2	MXene/SWCNTs coated CNT/PDMS	$\emptyset 800$	20 à 150	14	18	0,74	[40]
3	PE/COCe	300 x 470	20 à 30	1	12	0,04	[41]
4	Fishing lines and sewing treads (Nylon 6)	$\emptyset 860$	25 à 95	500	12	17,66	[3]
5				20	45	2,65	
6	CF/PDMS	$\emptyset 384$	20 à 230	1890	25	139,06	[4]
7			20 à 105*		10,2*	56,74*	
8	Kevlar/TPU	$\emptyset 1000$	25 à 105	800	6,6	15,54	
9				1000	6,3	18,54	

* Valeurs ajustées pour la même plage de température que les muscles Kevlar/TPU.

La description exhaustive des muscles présentés au Tableau 5.1 est disponible à la section 2.3 de la revue de littérature. Les muscles utilisant les CNTs, lignes 1 et 2 du Tableau 5.1 possèdent des pourcentages d'activation allant de 11% à 270 % supérieur au muscle Kevlar/TPU. Cependant, le muscle Kevlar/TPU peut soulever une masse 570% plus importante. Les coûts de production du muscle Kevlar/TPU sont aussi considérablement plus bas, dû au fort prix des CNTs [4]. Les muscles de PE/COCe, polymères non renforcés, offrent un pourcentage d'activation 80% plus élevé que les muscles Kevlar/TPU, mais cela, uniquement avec une masse de 1g. Les muscles à base de fil de pêche en Nylon 6 offrent des performances complémentaires aux muscles Kevlar/TPU en termes de travail produit lors de l'activation. Ils offrent des performances 90% plus élevées en contraction, mais les muscles Kevlar/TPU offre leur performance avec une masse 100% plus importante. Les muscles Nylon 6 produisent donc 17,66 J alors que les muscles Kev/TPU produisent jusqu'à 18,54 J. Contrairement aux muscles Kevlar/TPU, les muscles Nylon 6 ont aussi la capacité d'offrir de grands pourcentages d'activation lorsqu'une faible masse est soulevée. Les lignes 5 et 6 du Tableau 5.1 englobent les muscles artificiels renforcés avec des fibres dites conventionnelles, dont les muscles Kevlar/TPU font partis. Les muscles à base de fibres de CF/PDMS sont adaptés pour soulever des masses d'ordres de grandeur similaires aux muscles Kevlar/TPU, ils génèrent cependant des pourcentages d'activation près de 400% plus élevés et donc un travail 7,5 fois plus important. Cela est partiellement dû à la capacité du PDMS de résister à de plus haute température, ce qui permet de prolonger l'expansion thermique du polymère. Lorsque la contraction du muscle CF/PDMS est ajusté pour la même plage de température que les muscles Kev/TPU, le pourcentage d'activation est plutôt 55% plus élevé et le travail 3 fois plus élevé. Les muscles CF/PDMS possèdent aussi un diamètre plus petit que les muscles Kevlar/TPU, ce qui leur permet d'atteindre un angle de spire plus important avant d'atteindre la limite d'activation liée au contact entre les spires.

5.3 Conclusion

Il est ainsi possible de confirmer que les manipulations décrites dans les chapitres précédents ont permis de produire des muscles artificiels spiralés fonctionnels. Cela représente une validation de l'objectif principal de ce projet de recherche. Les activations moyennes pour les muscles de 5°, 10°, 15° et 20° soulevant une masse de 400g sont 3,5%, 4,3%, 6,1% et 5,1% respectivement. L'activation des muscles est linéaire entre 25°C et 105°C, excepté pour le muscle de 20° qui n'est linéaire que pour les températures sous 60°C. L'activation thermique du muscle 15° est linéaire

avec un coefficient R de 0,9946. L'impact de la masse soulevée sur l'activation du muscle a aussi été étudié pour le muscle 15° pour des masses de 400g, 600g, 800g et 1000g. La longueur du muscle au repos augmente avec la masse appliquée sur le chariot de poids, mais le pourcentage d'activation du muscle ne semble pas être affecté négativement. La performance du muscle est plus faible que les alternatives produites avec un filament plus mince. La rigidité plus élevée du filament produit, associé à son diamètre plus élevé, combiné à la forme du muscle résultant, possédant un faible indice de ressort, mène à un muscle rigide adapté aux masses plus élevées, mais jumelé à un pourcentage d'activation plus faible. L'utilisation d'un filament de plus petit diamètre ou la mise en forme des muscles par enroulement sur mandrin pourraient rebalancer les performances du muscle pour augmenter sa contraction avec les masses de 400g à 1000g.

CHAPITRE 6 Modéliser l'activation des muscles artificiels

Ce chapitre décrit les principes derrière le modèle cinématique d'activation thermique des muscles artificiels spiralés. Les manipulations et l'équipement nécessaires au fonctionnement du modèle sont aussi décrits. Un environnement de design facilitant l'interaction avec le modèle cinématique a été créé. Cet outil permet de rapidement modéliser la performance d'une configuration de muscle.

6.1 Principe modèle cinématique

Les muscles artificiels spiralés sont composés de fibres de renforts, en spirale autour de leurs spires. L'angle de torsion de ces fibres est le plus grand en surface des muscles et diminue graduellement jusqu'à la fibre neutre du muscle, dont l'angle de torsion est nul. Lors de l'activation des muscles, la température de ces derniers augmente, ce qui mène à l'expansion thermique du TPU agissant comme matrice pour les fibres de renfort. Les fibres de renforts, largement axiales au cœur du muscle, limitent l'expansion axiale du fil. L'expansion radiale n'ayant pas de limitation similaire, elle résulte en une augmentation du diamètre du fil à muscle. L'augmentation du diamètre du fil affecte la forme générale du muscle.

La Figure 6.1 schématise et explique le lien entre la structure du muscle et sa déformation. La Figure 6.1 a) montre un muscle spiralé avec les fibres de renforts enroulés sur le filament du muscle. Les Figure 6.1 b) à d) montrent une vue en transparence du muscle. Les muscles montrés ont des rayons différents. Dans la Figure 6.1b), le rayon est initial (r_i), dans la Figure 6.1 c) et d), le rayon est le rayon dilaté après chauffage (r_{fc}). La fibre bleue est la fibre extérieure enroulée sur le filament du muscle. Cette fibre bleue a une longueur l_{fe} . La fibre rouge représente le centre du filament du muscle. Cette fibre rouge suit parfaitement le parcours hélicoïdal de la fibre neutre des spires. Cette ligne rouge a une longueur de l_{fm} . La spirale du muscle a une longueur axiale hors-tout initiale ($l_{m,i}$) et finale ($l_{m,f}$). Cette longueur est celle qui mesure l'actuation du muscle.

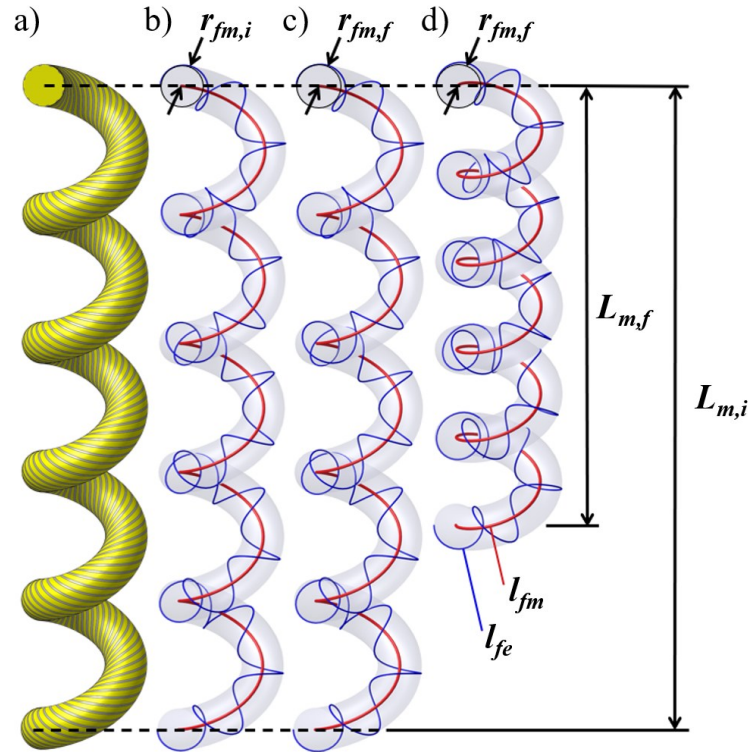


Figure 6.1 : Schéma du parcours de fibres selon l'état d'un muscle, a) Muscle artificiel spiralé initial, b) Fibres idéalisées à l'état initial, c) Fibres idéalisées à l'état chauffé, d) Fibres idéalisées à l'état final compensé

Le Tableau 6.1 liste les valeurs des différents éléments géométriques du muscle montré à la Figure 6.1 dans ces différents états. La deuxième colonne présente l'état de la Figure 6.1 a) et b), soit quand le muscle est dans sa forme initiale avant chauffage. Son r_i est de 1,200 mm et sa $l_{m,i}$ est de 15,88 mm. Dans cette forme initiale, le centre du filament du muscle spiralé à une longueur $l_{s,i}$ de 40,91 mm. La fibre extérieure à une longueur $l_{fe,i}$ de 69,15 mm. La troisième colonne du Tableau 6.1 présente un état hypothétique montré à la Figure 6.1 c), où le rayon aurait dilaté de 2% pour atteindre $r_f = 1,224$ mm mais en gardant l_m à 15,88 mm. Pour ce cas, l_{fm} reste à 40,91 mm, mais la fibre extérieure devrait allonger pour atteindre $l_{fe,f} = 70,09$ mm. L'expansion du rayon du filament augmente la longueur du parcours de la fibre bleu en surface, sans affecter la fibre neutre rouge. De manière analogue à l'explication de la création des nodules vue au Chapitre 3, cette situation est impossible. Le fil de Kevlar ne peut allonger sans des efforts de tension considérables. Afin de conserver la longueur des fibres en surface malgré l'expansion radiale du fil, la distance entre les spires doit être réduite jusqu'à ce que la longueur du parcours des fibres extérieur soit égale à celle du muscle initial sans expansion. Cette situation est montrée à la Figure 6.1 d) et dans

la quatrième colonne du Tableau 6.1. Dans cette situation, r_f est encore dilaté à 1,224 mm, mais la longueur axiale hors-tout du muscle doit être réduite à $l_m = 14,54$ mm. En résumé, dû à la conservation de longueur de la fibre extérieure spiralée, une augmentation de 2% du rayon de filament du muscle modélisé correspond à une activation de 8.4%.

Tableau 6.1 : Données géométriques du parcours de fibre selon l'état du muscle et sa compensation

État	Longueur initiale ($l_{m,i}$) et rayon initial ($r_{fm,i}$), (Figure 6.1b)	Longueur initiale ($l_{m,i}$) et rayon dilaté ($r_{fm,f}$) (Figure 6.1c)	Longueur raccourcie ($l_{m,f}$) et rayon dilaté ($r_{fm,f}$) (Figure 6.1d)
r_{fm} (mm)	0,600	0,612	0,612
l_{fm} (mm)	40,91	40,91	40,42
l_{fe} (mm)	69,15	70,09	69,15
l_m (mm)	15,88	15,88	14,54

Ce principe est le fondement du modèle cinématique utilisée pour modéliser l'activation par expansion thermique des muscles artificiels spiralés. Cette méthode de modélisation peut être adaptée à différentes géométries de muscles spiralés et ne nécessite pas de caractérisations des matières premières potentiellement coûteuses. Les seules données expérimentales nécessaires sont les valeurs d'expansion thermique axiale et radiale des filaments à muscles consolidés ainsi que certaines dimensions du muscle final.

6.2 Méthode expérimentale

6.2.1 Récolte de données dimensionnelles

La création d'un jumeau géométrique des muscles servant à modéliser leur performance nécessite de recueillir certaines dimensions influençant la structure des muscles ainsi que leur performance. Les variations du fini de surface ainsi que la variation de la forme des spires ne sont pas prises en compte. Les dimensions requises pour la modélisation du muscle artificiel spiralé ainsi que ses performances sont décrites à la Figure 6.2.

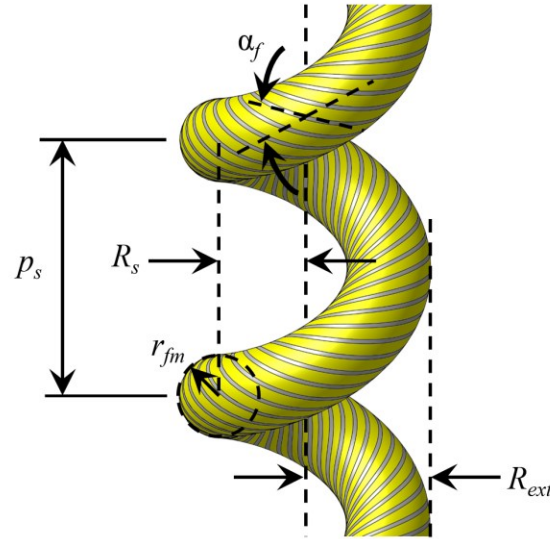


Figure 6.2 : Schéma des dimensions du muscle nécessaires à sa modélisation

Le modèle cinématique utilisé nécessite la mesure du rayon de spire R_s , du pas de spire p_s , de l'angle de torsion final α_f ainsi que du rayon du fil à muscle r_{fm} . Les valeurs de ces paramètres sont recueillies par mesure digitale à l'aide d'un microscope numérique suite à la mise en forme des muscles. Les muscles sous-tension sont immobilisés à l'aide du cadre tendeur. Le centre de spire R_s n'ayant pas de point de mesure précis, il est difficilement repérable sur une image. R_s est donc calculé en retirant le rayon du fil R_f au rayon extérieur de la spirale du muscle R_{ext} tel que :

$$R_s = R_{ext} - r_{fm} . \quad (8)$$

L'angle de torsion final α_f est mesuré lors de la mise en forme du muscle. L'angle de torsion de la dernière section droite du fil est noté avant qu'elle soit couverte de spires à son tour.

6.2.2 Analyse thermique

La Figure 6.3 décrit le système de mesure de l'expansion thermique utilisé pour recueillir les données nécessaires à la modélisation du muscle. Afin d'obtenir les valeurs d'expansion thermique des filaments pultrudés utilisés pour la production de muscles, une chambre thermique munie d'un système de mesure par corrélation d'images numériques (CIN) est utilisée.

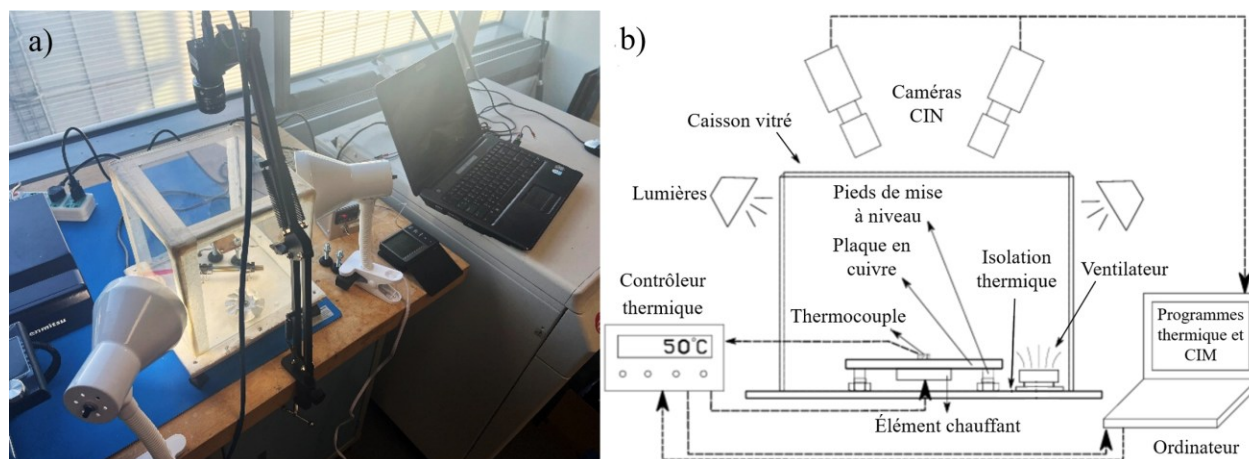


Figure 6.3 : Système de mesure d'expansion thermique, a) installation réelle, b) schéma explicatif

La chambre thermique du système de mesure d'expansion thermique de la Figure 6.3 est construite en verre. Cela permet aux caméras de capturer des images sans être exposées aux températures internes. Les variations de température sont contrôlées à l'aide d'un élément chauffant et d'un ventilateur à faible vitesse assurant une température égale à travers la chambre. Les échantillons mesurés sont déposés sur une plateforme de cuivre au centre de la chambre. Deux plaques métalliques, dont les valeurs d'expansion thermique sont connues, sont ajoutées afin de calibrer le système. La température de la chambre thermique augmente de 20°C à 50°C, puis de 50°C à 110°C par palier de 10°C. Chaque palier de température est maintenu suffisamment longtemps pour assurer l'absorption de chaleur à travers les composantes du système. Une mesure de l'expansion thermique est ensuite effectuée à l'aide du système de CIN. Deux caméras haute définition capturent des images de la plateforme de mesure en cuivre. Les images résultantes sont analysées par le programme VIC-3D afin d'observer les variations dimensionnelles des filaments à muscles chauffés. Il est nécessaire de couvrir les échantillons d'un motif irrégulier, aussi appelé motif mouchetis, à haut contraste afin de permettre au logiciel de CIN de suivre des points précis sur les échantillons. La Figure 6.4 montre le résultat de l'application de ce motif peint, utilisant des points noirs sur une couche de base blanche. Ces mesures ont été prises en collaboration avec le Professeur Hang Xu à l'Université Concordia. Les échantillons de filament à muscle testés sont soumis à plusieurs cycles de chauffe avant que leur expansion thermique ne soit mesurée.

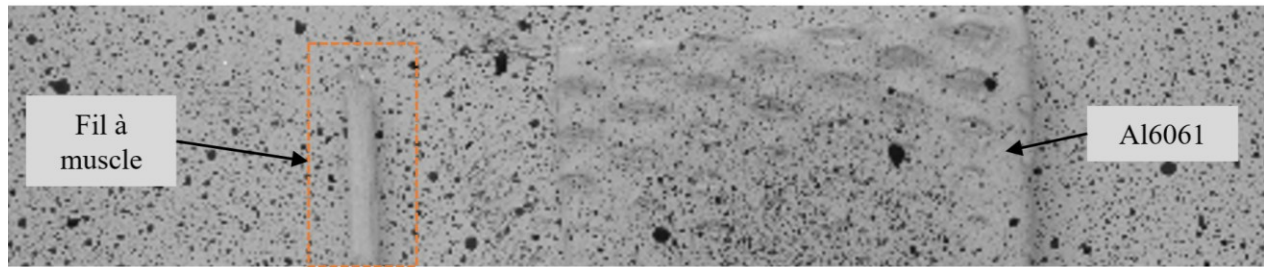


Figure 6.4 : Vue d'un filament à muscle et d'un échantillon de calibration en aluminium 6061 enduit de peinture au motif moucheté pour la mesure d'expansion thermique par CIN

6.2.3 Modèle et environnement de design

La Figure 6.5 montre le schéma de fonctionnement de l'environnement de design. L'environnement de design est utilisé afin d'interagir avec le modèle cinématique de l'activation thermique des muscles artificiels spiralés. L'environnement de design utilise le logiciel de conception assistée par ordinateur Catia V5 pour modéliser la forme du muscle et le parcours de ses fibres. Les valeurs dimensionnelles des muscles produits sont entrées dans une table de paramétrage et produisent une reproduction numérique du muscle modélisé. L'expansion thermique radiale du filament est reproduite et les dimensions balancées du muscle sont atteintes par un processus de convergence par itération. Ces nouvelles dimensions donnent la performance prévue du muscle pour la plage de température associée à la valeur d'expansion thermique entrée.

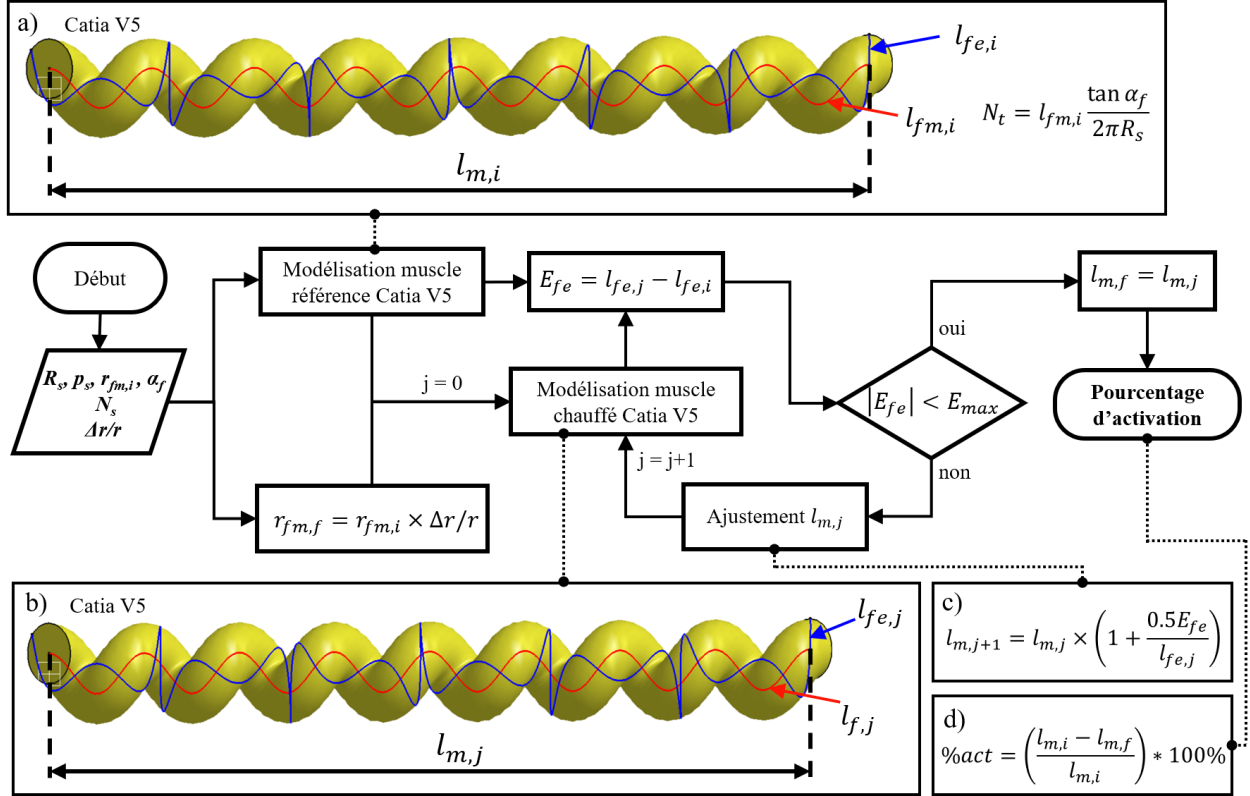


Figure 6.5 : Schéma du fonctionnement de l'environnement de design, a) Modélisation numérique du muscle de référence, b) Modélisation numérique de l'itération du muscle activé, c) Calcul du pourcentage d'activation final

Les données géométriques initiales du muscle sont fournies au modèle. Ces données sont le rayon de spire R_s , le pas de spire p_s , le rayon du filament non chauffé r_f ainsi que l'angle de torsion α_f . L'expansion thermique radiale mesurée sur la plage de température étudiée $\Delta r/r$ est aussi ajoutée au modèle. Le nombre de spires N_s du muscle souhaitant être modélisé est sélectionné. La longueur des fibres extérieures n'est pas égale sur toute la circonférence du filament spiralé. Cependant, l'évolution de la longueur du muscle affecte de manière uniforme l'entière des fibres en circonférence. L'étude de performance peut donc être effectuée sur une seule spire ($N_s = 1$) tant que la compensation de la longueur du muscle est effectuée selon la longueur de la même fibre externe isolée pour l'entière du processus. N_s est égale à 8 pour la Figure 6.5 afin d'illustrer plus clairement la contraction du muscle. La Figure 6.5 a) montre la modélisation du muscle initial non chauffé. La valeur initiale de la longueur du parcours des fibres extérieures $l_{f,e,i}$ est guidée par le nombre de tours N_t réalisé par la fibre extérieure selon α et la longueur initiale du filament $l_{f,m,i}$. Le modèle considère que la rotation des deux extrémités du muscle est complètement restreinte, le nombre de spires N_s ainsi que le nombre de tours des fibres N_t sont donc des valeurs fixes. La

valeur initiale de la longueur du parcours des fibres extérieures $l_{fe,i}$ est mise de côté comme valeur de référence. Le rayon du fil après expansion thermique $r_{fm,i}$ pour la température d'activation modélisée est calculé selon $r_{fm,i}$ et $\Delta r/r$ et vient remplacer la valeur initiale r_f pour la première itération de la modélisation du muscle activé, illustrée à la Figure 6.5 b). La longueur du parcours des fibres extérieures de l'itération $l_{fe,j}$ est ensuite extraite de la modélisation d'itération et l'erreur sur la longueur de la fibre extérieure E_{fe} est calculée. La valeur absolue de E_{fe} est comparée à l'erreur maximale tolérée E_{max} . Sa valeur est fixée à 0,001 dans le cadre de cette étude. Si E_{fe} est inférieur à E_{max} , la longueur du muscle d'itération $l_{m,j}$ est considérée comme la longueur finale du muscle chauffé $l_{m,f}$. Autrement, $l_{m,j}$ est ajustée pour la prochaine itération. La Figure 6.5 c) montre l'équation utilisée pour calculer la longueur du muscle pour la prochaine itération $l_{m,j+1}$. L'équation compense $l_{m,j}$ pour la moitié de E_{fe} sur $l_{fe,i}$ afin d'obtenir $l_{m,j+1}$. La moitié de E_{fe} est utilisé pour la compensation afin de converger vers $l_{m,f}$ sans surcompensation au fil des itérations. Cette boucle d'itération est répétée jusqu'à ce que la valeur absolue de E_{fe} soit inférieure à E_{max} . Lorsque $l_{m,f}$ est atteinte, le pourcentage d'activation de la plage de température étudiée est calculé et est donné comme résultat du modèle. La Figure 6.5 c) illustre l'équation du calcul du pourcentage d'activation du muscle.

6.3 Résultats et discussion

La Figure 6.6 montre une section du muscle artificiel spiralé en Kevlar/TPU ainsi que son jumeau géométrique côte à côte. Le muscle artificiel est celui produit avec le fil de 15° et les mesures de ses dimensions sont effectuées alors qu'une masse de 400g est installée sur le chariot de poids.

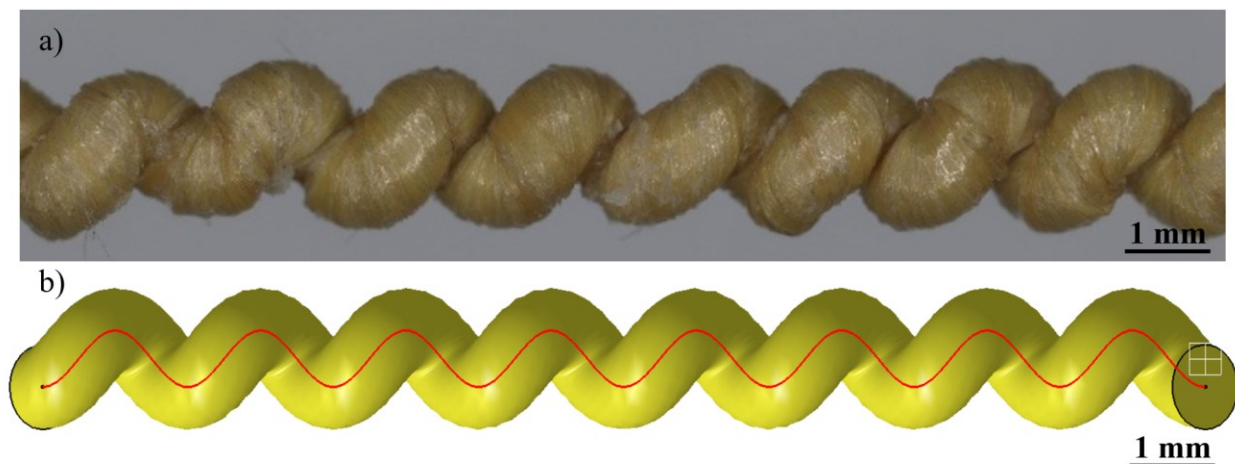


Figure 6.6 : Muscle artificiel spiralé, a) Réel, b) Modélisé numériquement

Les images de la Figure 6.6 sont à la même échelle afin de comparer une section de 8 spires des muscles. Le jumeau géométrique ne reproduit pas les variations de forme pouvant être retrouvées sur le muscle réel. Les variations de forme à travers les spires pourront être étudiées à l'aide d'un scan 3D du muscle qui sera comparé au muscle modélisé numériquement dans le cadre de travaux futurs. Le parcours des spires du jumeau géométrique apparaît en rouge à la Figure 6.6 b).

La Figure 6.7 montre l'évolution de l'expansion thermique du rayon du filament à muscle $\Delta r/r$ selon la température, où la variation positive du rayon est normalisée sur la valeur initiale de ce dernier. $\Delta r/r$ est utilisé pour calculer le rayon du muscle activé lors de la modélisation. Une courbe de tendance linéaire est superposée aux données afin d'étudier la linéarité.

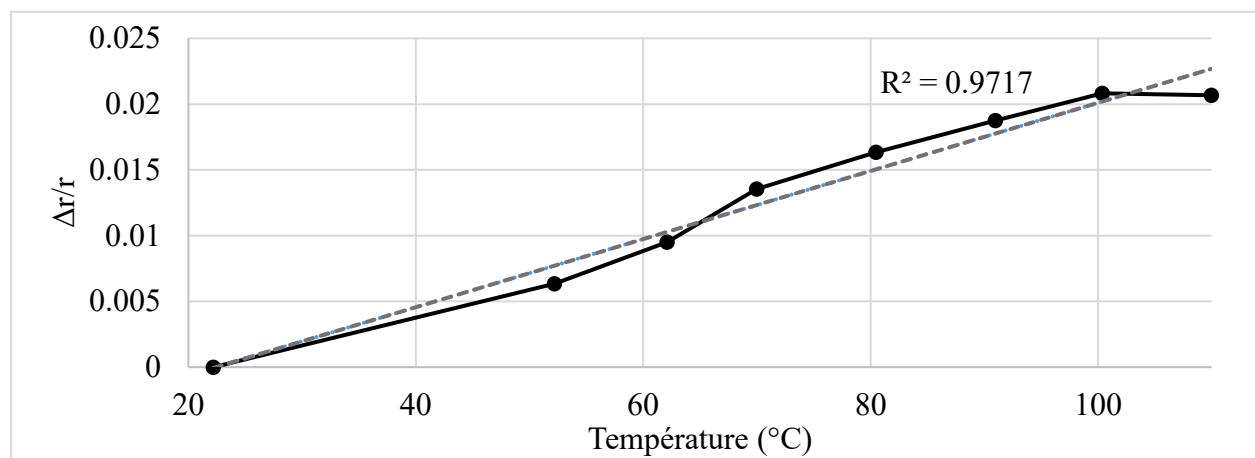


Figure 6.7 : Expansion thermique radiale du fil à muscle Kevlar/TPU selon la température

La courbe de l'expansion radiale du filament de 15° utilisé pour produire le muscle modélisé est mesurée après 3 cycles de chauffe. Les cycles de chauffe initiaux régularisent la courbe des différents échantillons testés et agissent de manière similaire à la stabilisation thermique auxquels les muscles formés sont exposés. L'évolution de l'expansion thermique radiale du filament est linéaire avec un coefficient R de 0,9717 sur l'ensemble de la gamme de températures testées. L'expansion thermique atteint cependant un plateau entre 100°C et 110°C. Les causes derrière ce plateau feront l'objet de travaux futurs.

Les valeurs de $\Delta r/r$ pour chaque point de mesure associé à un palier de température sont ensuite entrées dans le modèle cinématique de l'activation du muscle artificiel conjointement avec les dimensions du muscle tendu mesurées. La Figure 6.8 montre le pourcentage d'activation expérimental du muscle 15° ainsi que la courbe d'activation anticipée par le modèle cinématique d'activation thermique.

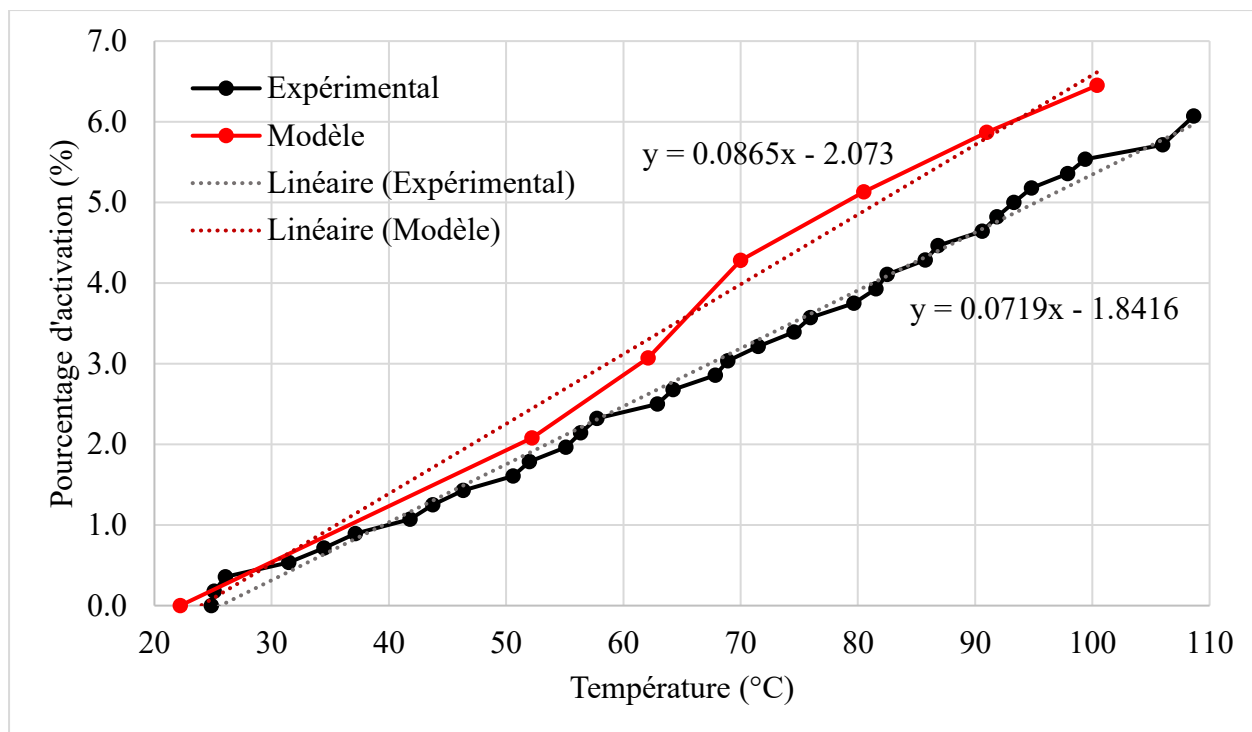


Figure 6.8 : Pourcentage d'activation du muscle 15° selon la température de l'environnement expérimental et modélisé

La Figure 6.8 montre que le modèle cinématique appliqué au jumeau géométrique du muscle 15° semble reproduire les résultats expérimentaux de l'activation thermique. Cependant, la pente de la courbe de tendance de l'activation modélisée dévie de celle des résultats expérimentaux et possède une erreur de 20% par rapport à cette dernière. Cela révèle le besoin de plus d'étude sur l'expansion thermique radiale des filaments pultrudés. Les filaments testés thermiquement ont subi 3 cycles de chauffage lors de la mesure de leur expansion thermique, mais les muscles artificiels subissent un plus grand nombre de cycles en plus d'une période de stabilisation à chaud. Une expérience future nécessaire serait d'imposer la même stabilisation thermique sous tension aux filaments pultrudés utilisés pour la mesure de l'expansion thermique. De plus, l'environnement de design modélise l'activation de muscles parfaitement contraints à leur extrémité. Les muscles activés à l'aide du tube de chauffage ont cependant des sections à l'extérieur du tube et de son écoulement d'air chaud. La mesure de l'activation expérimentale ne possède donc pas les mêmes conditions de contraintes aux extrémités de la zone activée du muscle. Les zones non activées peuvent atténuer l'activation mesurée en absorbant une portion de la torsion créée par l'activation locale du muscle.

6.4 Conclusion

Le modèle cinématique de l'activation thermique des muscles artificiels à base de filaments tordus a été intégré dans un environnement de design. Les mesures dimensionnelles principales d'un muscle artificiel ont été recueillies par microscopie numérique. La courbe d'expansion thermique radiale du filament utilisé pour sa mise en forme a été étudiée à l'aide d'une chambre thermique équipée d'un système de mesure par CIN. L'intégration de ces données dans l'environnement de design a permis de modéliser l'évolution de l'activation thermique du muscle artificiel et d'effectuer des itérations rapides. L'erreur sur la pente de l'activation modélisée étant de 20% par rapport à la pente de l'activation expérimentale. Cet outil et le processus d'acquisition des données nécessaires à son fonctionnement nécessitent donc des travaux plus approfondis afin de pouvoir modéliser avec précision l'activation des muscles. Présentement, l'environnement de design utilisé pour modéliser l'activation ne peut pas être ajusté pour des valeurs de tension autres que celle appliquée sur le muscle lors de la mesure de ces dimensions. Le besoin de cette fonctionnalité est atténué par les résultats d'activation du muscle artificiel avec différentes masses installées montrant un impact faible sur le pourcentage d'activation. L'environnement de design peut aussi être utilisé pour guider le développement de nouvelle configuration de muscles artificiels. L'impact sur le pourcentage d'activation de nouvelles géométries ou de matériaux possédant des coefficients d'expansion thermique différents peut être estimé. Une technique de modélisation plus avancée est nécessaire. La modélisation par élément fini incluant la modélisation multiéchelle est une alternative potentiellement prometteuse afin de déterminer les propriétés mécaniques et thermiques des filaments à muscle à l'échelle microscopique.

CHAPITRE 7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

7.1 Conclusion

Les muscles artificiels ont la capacité de répondre aux stimulus de l'environnement sans nécessiter un contrôle actif. Leur travail est donc infiniment efficace, car l'énergie nécessaire pour leur activation peut venir de sources externes comme le soleil qui réchauffe les surfaces ou la pluie qui les refroidit. Les muscles artificiels pourraient donc révolutionner les domaines comme les bâtiments à façades intelligentes, pouvant adapter leur forme aux conditions de leur environnement [43]. La démocratisation de leur utilisation par le développement d'une méthode de production à grande échelle et faibles coûts était la motivation derrière ces travaux.

Les travaux décrits dans ce mémoire ont mené à l'atteinte de l'objectif principal du projet : des muscles artificiels fonctionnels ont été produits à base de filaments composites Kevlar/TPU pultrudés.

Des filaments composites Kevlar/TPU ont été produits par pultrusion thermoplastique avec succès. Différentes configurations du filament ont été produites avec des angles de $5,0^\circ$, $9,7^\circ$, $15,3^\circ$ et $20,2^\circ$ avec une variation de $\pm 0,5^\circ$. Toutes les configurations possèdent une surface lisse sans présence d'accumulation de bris et ont en moyenne un diamètre de $0,97 \pm 0,1\text{mm}$. Leur niveau qualité est jugé comme suffisamment adéquat pour être utilisé dans la production de muscles artificiels spiralés, malgré la présence de zones riches en polymère sur la section transversale des filaments. Les filaments peuvent être produits en grande quantité pour être transformés en muscle artificiel de longueur spécifique selon les besoins.

Les filaments produits ont été utilisés pour produire plusieurs muscles artificiels spiralés fonctionnels. Lors de la mise en forme des muscles par IST, l'apparition de nodules a été notée, mais leur présence ne semble pas affecter négativement leur contraction. Les muscles artificiels résultants comptent en moyenne $5,6 \pm 0,3$ spires par centimètres et ont la forme d'une hélice dont l'indice de ressort est inférieur à 1. Lors de la mise en forme, la longueur du filament réduit en moyenne de 67%. Les muscles produits ont pu être retirés du système de mise en forme sans subir une réduction de leur torsion et une perte de leurs spires grâce à un cycle de stabilisation qui fige la forme du muscle. Ils pourraient ainsi être stockés pour être utilisés à une date ultérieure ou encore, être assemblés en groupe afin de soulever des masses plus importantes.

Les muscles produits ont été activés par variation thermique avec succès. Lors d'une variation de température entre 25°C et 105°C avec une masse de 400g, les muscles de 5°, 10°, 15° et 20° ont fourni des activations de $3,5\% \pm 0,6\%$, $4,3\% \pm 0,3\%$, $6,1\% \pm 0,9\%$ et $5,1\% \pm 0,5\%$ respectivement. Le muscle de 15° a soulevé une masse de 1000g sans réduire son activation. Les muscles produits sont moins performants que les alternatives existantes, mais ils se démarquent par leur capacité à conserver leur pourcentage d'activation, peu importe la charge appliquée.

Finalement, la performance d'activation des muscles a été reproduite à l'aide d'un modèle cinématique ne nécessitant qu'une seule expérience de caractérisation de la matière. L'expansion thermique radiale de plus de 2% du filament à muscle ainsi que le plateau atteint à 100°C ont été observés. Des travaux sont cependant nécessaires afin d'améliorer la précision du modèle cinématique. L'environnement de design créé autour du modèle cinématique peut être utilisé pour guider les paramètres des prochaines configurations de muscles.

7.2 Recommandations

Les filaments à muscle existants ont typiquement un diamètre dans les alentours de 0.4mm [4]. L'utilisation d'un filament à muscle de plus petit diamètre pourrait rendre de meilleures performances possibles. Le développement d'une gamme de filières de plus petit diamètre est donc recommandé. De plus, le silicone utilisé dans des muscles artificiels comparables à ceux produits possède un coefficient d'expansion thermique supérieur au TPU 95A utilisé en plus de pouvoir résister à des températures plus élevées [4]. L'exploration de TPU de dureté plus faible ou encore de thermoplastiques élastomères différents comme le SEBS ou le Nylon peut mener à des résultats plus performants.

Les filaments produits possèdent de hauts taux de fibres supérieurs à 50% répartis uniformément à travers leur section. Précédemment, l'équipement de pultrusion était limité à ce type de configuration pour les fibres. La production de filament avec des fibres uniquement sur leur surface et avec un cœur entièrement en polymère pourrait permettre d'obtenir une meilleure expansion thermique radiale du filament.

Les muscles artificiels spiralés ont été produits avec les différentes configurations de filaments à muscle en utilisant la méthode IST. Cette méthode résulte en des muscles artificiels à très faible indice de ressort. L'exploration de méthodes de mise en forme différentes comme l'enroulement sur mandrin ou le formage par torsion de couches est nécessaire.

Uniquement la contraction des muscles a été étudiée dans le cadre de ces travaux. Cependant, il serait bénéfique d'étudier le comportement en compression des muscles ainsi que leur capacité d'absorber le choc causé par une masse en chute libre et d'être ensuite activé.

La masse maximale de 1000 g appliquée au muscle de 15° n'a pas été dictée par la limitation de ses performances. Elle a plutôt été dictée par la limite du nombre de poids pouvant être installés sur le chariot. L'acquisition de poids plus important est nécessaire afin de caractériser la limite des performances des muscles produits. L'étude de la force de contraction des muscles à l'aide d'une cellule de charge est aussi nécessaire. De plus, le temps de transition entre les températures de la plage testée, surtout le temps de refroidissement, était relativement long. Cela limite l'efficacité de l'étude de la fatigue cyclique des muscles. La création d'un système thermique à écoulement d'eau similaire à celui observé dans les travaux de Haines, et al. [3] serait une bonne alternative. Il est aussi nécessaire de caractériser un plus grand nombre de muscles de chacune des configurations afin de réduire les incertitudes sur les mesures.

Les travaux de caractérisation de l'expansion thermique radiale et axiale du filament de muscle ont été limités à la configuration 15°. Il est nécessaire de tester les autres configurations. Les valeurs d'expansion thermique radiale mesurées du filament n'étaient pas autant linéaires que les valeurs de l'activation du muscle. La même période de stabilisation thermique sous tension devrait être réalisée sur les échantillons de filament testés. Malgré son manque de précision, le modèle créé dans le cadre de ces travaux peut tout de même être utilisé pour avancer le développement de nouveaux muscles et il est présentement grandement sous-exploité. Il est présentement possible de s'en servir afin d'évaluer de nouvelles géométries de muscles ou de nouveaux matériaux pour les filaments.

Finalement, la création de plusieurs muscles de la même configuration, possédant des performances similaires, ouvre la possibilité de réunir plusieurs muscles en parallèle afin de soulever des masses plus importantes. Un prototype dans un environnement subissant des variations de température comme une trappe de radiateur ou encore un rideau solaire pourrait montrer le potentiel d'application réel des muscles produits.

RÉFÉRENCES

- [1] M. D. Lima, N. Li, M. Jung de Andrade, S. Fang, J. Oh, G. M. Spinks, *et al.*, "Electrically, Chemically, and Photonically Powered Torsional and Tensile Actuation of Hybrid Carbon Nanotube Yarn Muscles," *Science*, vol. 338, pp. 928-932, 2012.
- [2] C. Lamuta, "Perspective on highly twisted artificial muscles," *Applied Physics Letters*, vol. 122, 2023.
- [3] C. S. Haines, M. D. Lima, N. Li, G. M. Spinks, J. Foroughi, J. D. W. Madden, *et al.*, "Artificial Muscles from Fishing Line and Sewing Thread," *Science*, vol. 343, pp. 868-872, 2014/02/21 2014.
- [4] C. Lamuta, S. Messelot, and S. Tawfick, "Theory of the tensile actuation of fiber reinforced coiled muscles," *Smart Materials and Structures*, vol. 27, p. 055018 (13 pp.), 05/ 2018.
- [5] S. Maxson, P. Kotak, T. Weerakkody, and C. Lamuta, "'Manufacturing and underwater cyclic behavior of different types of twisted and coiled artificial muscles (TCAMs)," *Manufacturing Letters*, vol. 40, pp. 75-80, 2024/07/01/ 2024.
- [6] K. Minchenkov, A. Vedernikov, A. Safonov, and I. Akhatov. (2021, Thermoplastic Pultrusion: A Review. *Polymers* 13(2), 180.
- [7] B. Rădulescu, A. M. Mihalache, A. Hrițuc, M. Rădulescu, L. Slătineanu, A. Munteanu, *et al.* (2022, Thermal Expansion of Plastics Used for 3D Printing. *Polymers* 14(15), 3061.
- [8] P. Mallick, *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, And Design* vol. 2, 2007.
- [9] G. Anagnostopoulos, J. Parthenios, and C. Galiotis, "Thermal stress development in fibrous composites," *Materials Letters*, vol. 62, pp. 341-345, 2008/02/15/ 2008.
- [10] A. A. Safonov, P. Carlone, and I. Akhatov, "Mathematical simulation of pultrusion processes: A review," *Composite Structures*, vol. 184, pp. 153-177, 2018/01/15/ 2018.
- [11] S. M. Moschiar, M. M. Reboredo, and A. Vazquez, "6 - Pultrusion Processing," in *Advanced Polymer Processing Operations*, N. P. Cheremisinoff, Ed., ed Westwood, NJ: William Andrew Publishing, 1998, pp. 126-156.
- [12] S. M. Haffner, K. Friedrich, P. J. Hogg, and J. J. C. Busfield, "Finite-element-assisted modelling of a thermoplastic pultrusion process for powder-impregnated yarn," *Composites Science and Technology*, vol. 58, pp. 1371-1380, 1998/08/01/ 1998.
- [13] G. Sala and D. Cutolo, "The pultrusion of powder-impregnated thermoplastic composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 28, pp. 637-646, 1997/01/01/ 1997.
- [14] Svensson, R. Shishoo, and M. Gilchrist, "Manufacturing of Thermoplastic Composites from Commingled Yarns-A Review," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 11, pp. 22-56, 01/01 1998.
- [15] A. Luisier, P. E. Bourban, and J. A. E. Månson, "Reaction injection pultrusion of PA12 composites: process and modelling," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 34, pp. 583-595, 2003/07/01/ 2003.

- [16] K. van Rijswijk and H. E. N. Bersee, "Reactive processing of textile fiber-reinforced thermoplastic composites – An overview," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 38, pp. 666-681, 2007/03/01/ 2007.
- [17] F. Lapointe and L. Laberge Lebel, "Fiber damage and impregnation during multi-die vacuum assisted pultrusion of carbon/PEEK hybrid yarns," *Polymer Composites*, vol. 40, pp. E1015-E1028, 2019.
- [18] F. Lessard, M. Dubé, and L. Laberge Lebel, "A model of multi-die thermoplastic pultrusion," *Composites Part B: Engineering*, vol. 247, p. 110319, 2022/12/01/ 2022.
- [19] D.-H. Kim, W. I. Lee, and K. Friedrich, "A model for a thermoplastic pultrusion process using commingled yarns," *Composites Science and Technology*, vol. 61, pp. 1065-1077, 2001/06/01/ 2001.
- [20] N. Aegerter, M. Volk, C. Maio, C. Schneeberger, and P. Ermanni, "Pultrusion of hybrid bicomponent fibers for 3D printing of continuous fiber reinforced thermoplastics," *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, vol. 4, pp. 224-234, 2021/10/01/ 2021.
- [21] F. Ferreira, P. Fernandes, N. Correia, and A. T. Marques. (2021, Development of a Pultrusion Die for the Production of Thermoplastic Composite Filaments to Be Used in Additive Manufacture. *Journal of Composites Science* 5(5), 120.
- [22] L. Laberge Lebel, P. Monnot, A. Oswald, and F. Lapointe, "Pultruded beam reinforced with natural fibers, pultrusion system and method therefor," US 10,913,220 B2, February 9, 2021. Available : <https://patents.google.com/patent/US10913220>. Accessed on : May 18, 2026. [Online].
- [23] A. Oswald, F. L. Lapointe, and L. Laberge Lebel, "Multi-die, vacuum assisted pultrusion of flax/PLA thermoplastic biocomposite rods," presented at the 17th European Conference on Composite Materials (ECCM 2016), Munich, Germany, 2016.
- [24] M. Eichenhofer, J. C. H. Wong, and P. Ermanni, "Exploiting cyclic softening in continuous lattice fabrication for the additive manufacturing of high performance fibre-reinforced thermoplastic composite materials," *Composites Science and Technology*, vol. 164, pp. 248-259, 2018/08/18/ 2018.
- [25] N. Elderfield, O. Cook, and J. C. H. Wong, "Fiber dispersion as a quality assessment metric for pultruded thermoplastic composites," *Composites Part B: Engineering*, vol. 275, p. 111321, 2024/04/15/ 2024.
- [26] N. Alsinani, M. Ghaedsharaf, and L. Laberge Lebel, "Effect of cooling temperature on deconsolidation and pulling forces in a thermoplastic pultrusion process," *Composites Part B: Engineering*, vol. 219, pp. 49-63, 08/15 2021.
- [27] L. Laberge Lebel and N. A. Alsinani, "Pultrusion system with cooling stage and method therefor," WO 2020/237381 A1, December 3, 2020. Available : <https://patents.google.com/patent/WO2017219143A1/en>. Accessed on : May 18, 2026. [Online].

- [28] M. Volk, J. Wong, S. Arreguin, and P. Ermanni, "Pultrusion of large thermoplastic composite profiles up to Ø 40 mm from glass-fibre/PET commingled yarns," *Composites Part B: Engineering*, vol. 227, 2021.
- [29] A. Frick and A. Rochman, "Characterization of TPU-elastomers by thermal analysis (DSC)," *Polymer Testing*, vol. 23, pp. 413-417, 2004/06/01/ 2004.
- [30] H. J. Qi and M. C. Boyce, "Stress-strain behavior of thermoplastic polyurethanes," *Mechanics of Materials*, vol. 37, pp. 817-839, 2005/08/01/ 2005.
- [31] E. L. d'Hooghe and C. M. Edwards, "Thermoplastic Composite Technology; Tougher Than You Think," *Advanced Materials*, vol. 12, pp. 1865-1868, 2000/12/01 2000.
- [32] N. K. Naik and V. Madhavan, "Twisted impregnated yarns: elastic properties," *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 35, pp. 83-91, 03/ 2000.
- [33] D. R. Askeland and W. J. Wright, *The science and engineering of materials*, Seventh edition ed. Boston, MA: Cengage Learning, 2016.
- [34] F. Deng, W. Lu, H. Zhao, Y. Zhu, B.-S. Kim, and T.-W. Chou, "The properties of dry-spun carbon nanotube fibers and their interfacial shear strength in an epoxy composite," *Carbon*, vol. 49, pp. 1752-1757, 2011/04/01/ 2011.
- [35] M. Zhang, K. R. Atkinson, and R. H. Baughman, "Multifunctional Carbon Nanotube Yarns by Downsizing an Ancient Technology," *Science*, vol. 306, pp. 1358-1361, 2004/11/19 2004.
- [36] S. Aziz, J. G. Martinez, J. Foroughi, G. M. Spinks, and E. W. H. Jager, "Artificial Muscles from Hybrid Carbon Nanotube-Polypyrrole-Coated Twisted and Coiled Yarns," *Macromolecular Materials and Engineering*, vol. 305, 2020.
- [37] M. Zhang, S. Fang, W. Cai, C. Huynh, F. Göktepe, J. Oh, *et al.*, "Mandrel-free fabrication of giant spring-index and stroke muscles for diverse applications," *Science*, vol. 387, pp. 1101-1108, 2025/03/07 2025.
- [38] A. Fahim Golestaneh, V. Cichella, and C. Lamuta, "Physics-based modeling of twisted and coiled artificial muscles (TCAMs) for soft robotics using extended Cosserat theory of rods," *Smart Materials and Structures*, vol. 34, 04/14 2025.
- [39] R. Wang, S. Fang, Y. Xiao, E. Gao, N. Jiang, Y. Li, *et al.*, "Torsional refrigeration by twisted, coiled, and supercoiled fibers," *Science*, vol. 366, pp. 216-221, 2019/10/11 2019.
- [40] L. Dong, M. Ren, Y. Wang, J. Qiao, Y. Wu, J. He, *et al.*, "Self-sensing coaxial muscle fibers with bi-lengthwise actuation," *Materials Horizons*, vol. 8, pp. 2541-2552, 2021.
- [41] M. Kanik, S. Orguc, G. Varnavides, J. Kim, T. Benavides, D. Gonzalez, *et al.*, "Strain-programmable fiber-based artificial muscle," *Science*, vol. 365, pp. 145-150, 2019/07/12 2019.
- [42] X. Tang, Y. Liu, K. Li, W. Chen, and J. Zhao, "Finite element and analytical models for twisted and coiled actuator," *Materials Research Express*, vol. 5, 12/05 2017.
- [43] M. Jafari and A. Alipour, "Review of approaches, opportunities, and future directions for improving aerodynamics of tall buildings with smart facades," *Sustainable Cities and Society*, vol. 72, p. 102979, 2021/09/01/ 2021.