

Rapport présenté en vue de l'obtention du
MASTER 1 IEAP
INGENIERIE ET ERGONOMIE DU MOUVEMENT HUMAIN
SBI /ISM

Caractérisation et optimisation d'un actionneur bio-inspiré

Présenté par

Lucie Bettinger

Sous la direction de

Loïc Tadrist et de Raphaël Perrier

Année 2022-2023

Sommaire

1. Présentation de la structure de stage et de la mission confiée.....	3
2. Contexte scientifique.....	3
3. Matériels et Méthodes	7
3.1 Prototypage.....	7
3.1.1 Présentation du premier prototype	7
3.1.2 Mise en marche du prototype.....	8
3.1.3 Dimensionnement des ressorts.....	9
3.1.4 Dimensionnement du pont de liaison actine-myosine bio-inspiré	9
3.1.5 Dimensionnement du guide de déplacement	10
3.2 Méthode de mesure.....	10
3.2.1 Mesure de la masse d'un prototype	11
3.2.2 Mesure de la force maximale (blocking-force) d'un prototype	11
3.2.3 Mesure de la vitesse maximale d'un prototype.....	11
3.2.4 Élaboration de la relation Force/Vitesse d'un prototype.....	12
4. Résultats	12
4.1 Mise en évidence du problème d'usure	12
4.2 Apport du système pignon/crémaillère	13
4.2.1 Différence de force maximale, vitesse maximale et masse totale	13
4.2.2 Différence de relation force/vitesse	14
4.3 Apport des ressorts	14
4.4 Modifications des délais et apport d'un nouveau générateur	15
5. Discussion	16
6. Conclusion et Perspectives.....	18
7. Bibliographie.....	18
9. Annexe(s)	20

1. Présentation de la structure de stage et de la mission confiée

Ce stage a été effectué dans les locaux de l'IUT (Institut Universitaire Technologique) d'Aix-en-Provence. Cette structure faisant partie d'Aix-Marseille Université permet l'apprentissage de compétences et connaissances dans de nombreux domaines techniques et scientifiques et permet d'avoir l'accès à de nombreux matériels utiles à la recherche.

C'est en particulier dans l'équipe de recherche SBI (Systèmes Bio-Inspirés) de l'Institut du Mouvement Humain (ISM), dirigée par Jean-Marc Linares et Stéphane Violet, que ces deux mois de stage se sont déroulés. Cette équipe a pour objectif de proposer des innovations en ingénierie basées sur la compréhension du vivant. L'axe « Mécanismes Bio-Inspirés » comprend des travaux orientés sur trois axes : la structure de pièces bio-inspirées des os longs, les liaisons mécaniques bio-inspirées de la morphogénèse et les actionneurs et les dissipateurs bio-inspirés. Le stage s'inscrit dans ce dernier axe. Son objectif est la caractérisation et l'optimisation d'un actionneur bio-inspiré du muscle sous la direction de Loïc Tadrist.

La mission confiée est de caractériser et optimiser un prototype de sarcomère artificiel. Ce dernier, une fois fonctionnel, sera répliqué et assemblé en série et en parallèle pour créer un muscle artificiel. Cela permettra par la suite d'obtenir d'une part un actionneur avec des propriétés intéressantes du muscle, comme par exemple, la résilience. D'autre part, il permettra aussi d'obtenir une maquette mécanique du muscle pour pouvoir tester et caractériser chaque paramètre biomécanique indépendamment.

2. Contexte scientifique

Les actionneurs mécaniques sont de nos jours, utilisés quotidiennement dans de nombreux domaines, de l'aéronautique au médical en passant par l'automobile ou la robotique. Il en existe une grande variété dont le but est de transformer l'énergie reçue en phénomène physique, que ce soit de la chaleur, du son, une pression, un mouvement ... Une partie d'entre eux sont bio-inspirés. De nombreux muscles robotiques artificiels, bio-inspirés pour générer un mouvement à partir d'un courant électrique sont répertoriés par *Zhang et al. (2019)*. Il existe par exemple les actionneurs IMPC (Ionic Polymer Metal Composites), qui sont des polymères actifs capables de changer de forme sous l'effet de stimuli électriques. Une membrane de ces polymères est prise en sandwich entre deux couches de métal. Ils sont

caractérisés par une fréquence de fonctionnement élevée sous une faible tension mais développent peu de force ou une faible déformation (et donc un faible pourcentage de changement de longueur par rapport à sa longueur initiale). En plus de ne pas respecter la structure multi-échelle des muscles striés squelettiques (voir ci-dessous), ces actionneurs ne correspondent donc pas aux propriétés du muscles, telles que la résilience ou la relation force-vitesse de ces derniers. Il est possible de mentionner aussi les actionneurs TSA (Twisted String Actuator), qui produisent des mouvements linéaires en convertissant un mouvement de rotation d'un moteur électrique en traction linéaire. Ces derniers ont une structure mécanique simple et plus semblable à celle du muscle étant composé d'une chaîne, centrale comparable aux fibres d'actine et d'engrenages comparables aux ponts de myosine. Cependant, ils ont un mode de contrôle difficile en raison de leur rapport d'engrenage qui est non linéaire (c'est-à-dire que le rapport de transmission est réduit de manière non linéaire lorsque la corde est tordue) en plus d'une durée de vie limitée, due à l'usure des cordes. Aucun de ces actionneurs ne peut être considéré à la fois comme un modèle mécanique du la structure musculaire et comme résilient (voir ci-dessous). Il est à noter que la résilience peut être définie comme la faculté d'un actionneur à maintenir ses capacités de mouvement lorsqu'il est perturbé ou endommagé.

Tous les actionneurs subissent au cours de leur utilisation de nombreux dommages ou usures qui peuvent mettre en péril le fonctionnement de la structure en général. Pour contrer ce problème, la solution actuelle est la redondance : lorsqu'un actionneur cesse de fonctionner, il est prévu que d'autres identiques prennent le relais de ce dernier. Cette méthode est coûteuse que ce soit en matériaux, en énergie ou encore de place utilisée. Il existe aussi la solution du surdimensionnement, qui consiste à prévoir plus que nécessaire que ce soit en énergie ou en taille, et qui est donc toute aussi coûteuse. Ainsi, il est nécessaire de penser à une solution alternative. Il est souhaitable que les actionneurs soient capables d'encaisser ces dommages sans pour autant arrêter le fonctionnement de la machine. La résilience semble donc être un concept prometteur.

Perrier et al. (2022) ont formalisé ce concept de résilience pour les actionneurs. Cette propriété peut s'exprimer de la manière suivante :

$$\chi = \frac{\int_{cycle} f^*(t)v^*(t)dt}{\int_{cycle} f(t)v(t)dt} \frac{1}{1-\eta}.$$

où, $f(t)$ et $v(t)$ correspondent aux variations temporelles de la force et de la vitesse produite par l'actionneur pendant un cycle type. η est le niveau de dommage, c'est-à-dire le volume de dommage rapporté au volume total de l'actionneur. Cette formule, assez générale pour englober les actionneurs biologiques et industriels, permet de calculer un indice de résilience pour l'ensemble des actionneurs. Même si elle ne considère pas toutes les variables pouvant définir le niveau de dommage, elle rend possible la comparaison de la résilience de plusieurs prototypes. Ainsi, le muscle strié squelettique est résilient contrairement aux actionneurs industriels, qu'ils soient bio-inspirés ou non. En effet, lorsque la formule ci-dessus est appliquée, l'indice de résilience du muscle s'élève environ à 0,78 contre 0,005 pour un vérin hydraulique.

Le muscle strié squelettique est donc intéressant car il est a priori résilient. En effet, lorsque qu'une myofibrille connaît une micro-rupture au niveau de la strie Z, (c'est-à-dire l'extrémité du sarcomère) causant par la suite les courbatures, cela n'entraîne pas un arrêt du fonctionnement du muscle en général. Par exemple, lors d'un cycle étirement-détente, même si les performances baissent globalement avec l'apparition de la fatigue musculaire (due à des blessures musculaires induites par l'exercice), le mouvement demandé reste réalisable pour l'ensemble des participants (Nicol *et al.*, 2006). Il est à noter que les conséquences des dommages musculaires sont mesurées ici par l'incapacité de maintenir une certaine force ou de travailler à une intensité donnée, qui sont deux variables quantifiables pour déterminer la résilience d'un muscle mais aussi d'un actionneur mécanique. Il est donc intéressant de comprendre son organisation structurelle et de ses modes de commandes, afin de tester et caractériser sa résilience.

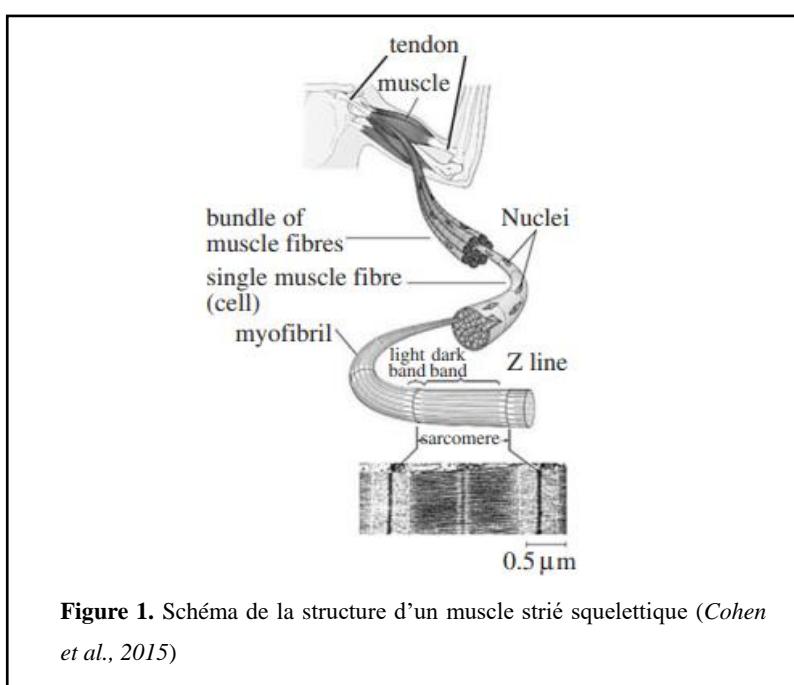


Figure 1. Schéma de la structure d'un muscle strié squelettique (Cohen *et al.*, 2015)

Un muscle est une structure multi-échelle, c'est-à-dire hiérarchisée et organisée à plusieurs échelles. Il est composé de multiple faisceaux musculaires, eux-mêmes composés de fibres musculaires (les cellules musculaires) qui contiennent de nombreuses myofibrilles toutes agencées en parallèle (**Figure 1**). Une myofibrille est un succession de sarcomères, l'unité répétitive des muscles striés placée en série, qui se contractent et se relâchent grâce aux ponts de myosine qui se fixent sur les filaments d'actine. Plus précisément, les filaments d'actine et de myosine glissent l'un sur l'autre lorsque le muscle se raccourcit (*Squire, 2019*). Sous l'effet de l'ATP et de l'hydrolyse de ce dernier (**Figure 2.b**), les filaments de myosine composé d'une tige et d'une tête (associé à deux chaînes légères) initialement liés aux filaments d'actines (composés de molécules de tropomyosine et de troponine (**Figure 2.a**)), se détachent pour faire coulisser un filament sur l'autre. S'en suit ensuite l'étape de récupération (de (**Figure 2.c**) à (**Figure 2.d**)) où le bras de levier revient à sa position initiale.

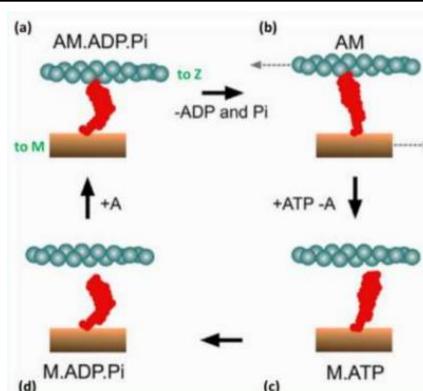


Figure 2. Schéma simplifié d'un cycle contractile piloté par l'ATP (a) état initial attaché, (b) état final (de type rigueur) après la libération du produit (ADP et Pi), (c) état détaché induit par la liaison à l'ATP, (d) tête de myosine après hydrolyse de l'ATP avec les produits ADP et Pi liés (*J.Squire, 2019*)

Il est connu que la force maximale d'un muscle dépend du nombre de sarcomères en parallèle tandis que la vitesse de raccourcissement dépend du nombre de sarcomères en série (*M. Narici et al., 2016*). Ce nombre est même déterminé par *Cohen et al. (2015)*, en fonction de la longueur du muscle, de la longueur d'un sarcomère, de la vitesse de contraction et de la vitesse de glissement des fibres. Il s'élève à $4*10^{10}$ dans un biceps et permet de déduire le nombre de têtes de myosine actives simultanément dans un sarcomère de ce muscle (environ 3000). Si ce nombre de sarcomères fonctionnels vient à diminuer, l'actionneur (ici, le muscle) sera moins puissant possédant donc moins de têtes de myosine actives. Cependant, il pourra toujours effectuer partiellement la tâche demandée.

Notre hypothèse de travail est donc que c'est cet assemblage structuré de sarcomères qui permet la résilience du muscle. Pour la tester, une maquette mécanique du muscle sera construite en copiant la structure de l'organe. Pour ce faire, la première étape est de créer un sarcomère mécanique fonctionnel, qui s'approche le plus possible de la microstructure du cytosquelette d'actine-myosine. Par la suite, cette « brique » élémentaire sera répliquée en série et en parallèle pour tester la résilience de la maquette du muscle.

Le but de ce stage de Master 1 est d'aider à l'optimisation et à la caractérisation d'une maquette mécanique de sarcomère. Un premier prototype a été conçu par R. Perrier (Doctorant ISM) et sert de base de départ à mon travail. Le premier objectif du stage est de terminer la conception de la maquette de sarcomère pour la rendre fonctionnelle. Le deuxième objectif est de caractériser précisément cette dernière afin de contrôler sa capacité à mimer le fonctionnement du sarcomère réel.

3. Matériels et Méthodes

3.1 Prototypage

3.1.1 Présentation du premier prototype

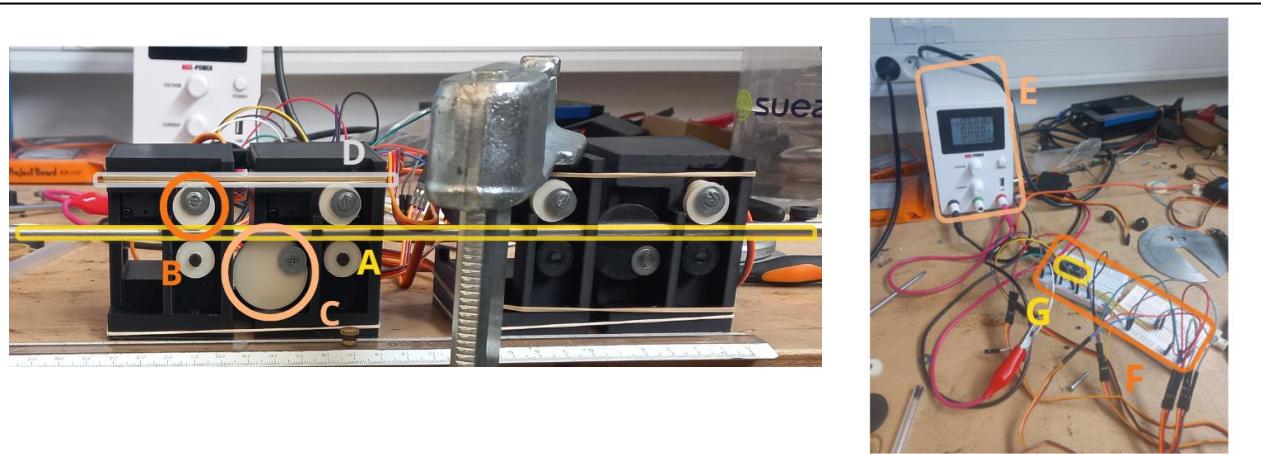


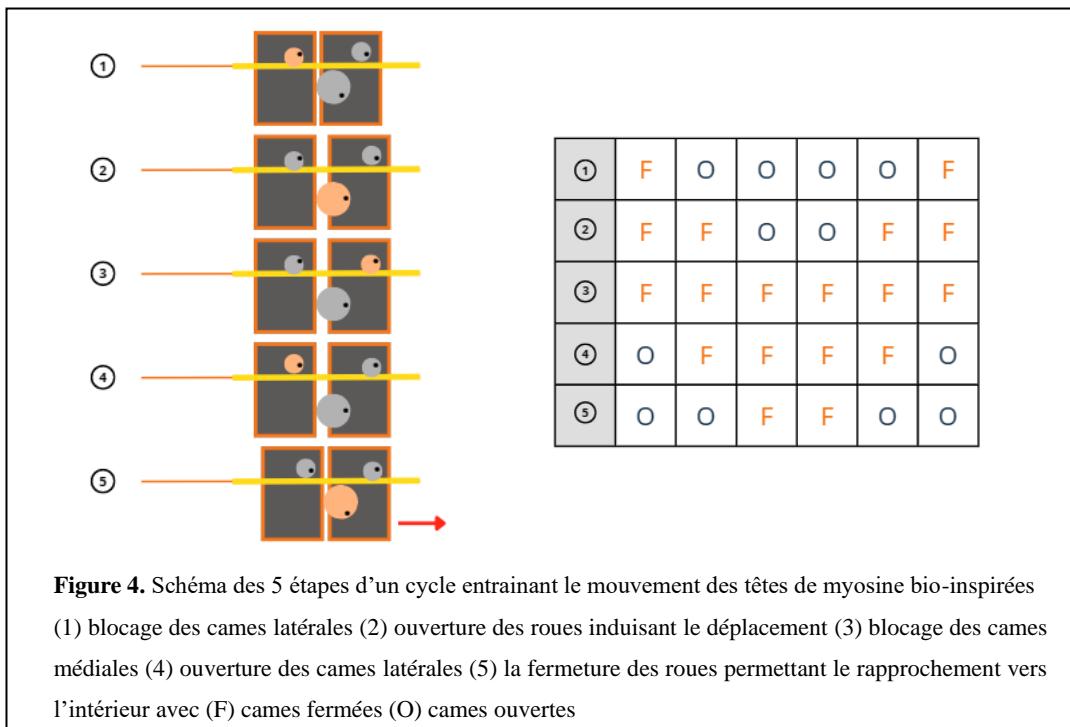
Figure 3. Premier prototype (P1) composé de (A) barre mobile (B) cames fixées sur des servomoteurs (C) roues de déplacement fixées sur des servomoteurs (D) élastique, alimenté par un générateur (E) branché aux servomoteurs (F), contrôlé par une carte Arduino (G)

Le premier prototype est composé de quatre têtes de myosine mécanique, représentées par les quatre boitiers. Elles sont reliées par une barre mobile, qui permet le déplacement de l'une des

deux parties, l'autre étant fixée au support. Les cames serrent à tour de rôle la barre, la bloquant du côté voulu pendant que la roue de déplacement écarte les boîtiers d'une tête de myosine. Les élastiques rapprochent les deux boîtiers quand la roue remonte (**Figure 4**). Tout ce système est commandé par une carte Arduino et alimenté par un générateur. Au cours de ce stage, des améliorations sont apportées à ce premier prototype.

3.1.2 Mise en marche du prototype

La première étape est de mettre en fonctionnement grâce à l'élaboration d'un code de programmation sur le logiciel Arduino, afin que les mouvements des servo-moteurs commandés par la carte Arduino permettent le rapprochement des quatre têtes de myosine bio-inspirées. Cinq étapes sont nécessaires pour les rapprocher : (1) le blocage des cames latérales (loin du centre du système), (2) l'ouverture des roues induisant le déplacement, (3) le blocage des cames médiales (proche du centre du système), (4) l'ouverture des cames latérales, (5) la fermeture des roues permettant le rapprochement vers l'intérieur.



Il est donc nécessaire de faire une fonction regroupant toutes ces étapes (**Annexe 1**). De plus, afin d'effectuer les tests de caractérisation du prototype, il faut créer une fonction permettant d'ouvrir toutes les cames, laissant la barre mobile libre afin de revenir à l'état initial et une fonction permettant de toutes les fermer pour bloquer la barre sans mouvement (blocking-

force). Une fois toutes les fonctions créées, elles sont regroupées dans une machine d'état (**Annexe 2**) facilitant le contrôle du prototype.

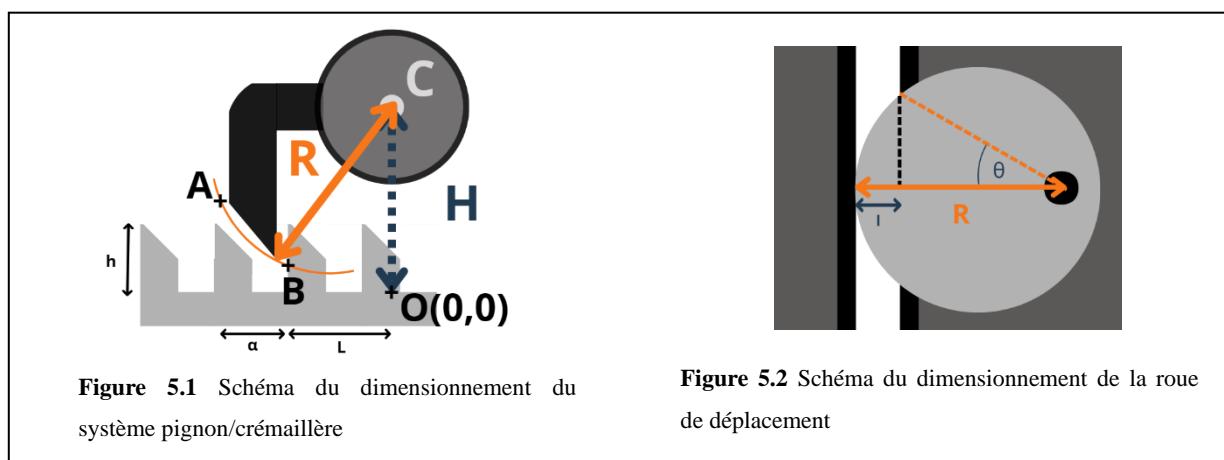
3.1.3 Dimensionnement des ressorts

Le rapprochement de deux têtes de myosine après leur écartement dû au mouvement de la roue centrale, permettant par la suite le raccourcissement du sarcomère, est dans un premier temps assuré par les élastiques. La première amélioration de ce prototype est de remplacer ces derniers par des ressorts, dimensionnés pour que le bilan des moments des forces appliquées entre les deux têtes de myosine s'annule au point de contact de la roue sur le boîtier (**Annexe 3**).

En connaissant la longueur et la position de chaque ressort, la raideur de ces derniers est calculée ainsi que leur nombre de spires nécessaire en fonction du matériau (**Annexe 4**). Ils sont finalement commandés par la suite grâce aux résultats de ces calculs, en prenant en compte les longueurs et raideurs nécessaires.

3.1.4 Dimensionnement du pont de liaison actine-myosine bio-inspiré

Afin de se rapprocher du système du muscle et ses récepteurs de myosine, les tropomyosines, disposés à intervalle régulier sur la fibre d'actine, la barre mobile et les cames sont remplacées par une crémaillère avec des pignons qui s'insèrent dans des crans eux aussi réguliers. Cela permet aussi de limiter le problème d'usure rencontré sur le prototype initial (voir Résultats 5.1).



La hauteur d'un cran de la crémaillère, h , ainsi que la longueur d'un pas, α , sont fixées (Figure 5.1). Ainsi, $h = 3$ mm et $\alpha = 4$ mm. Avec l'équation du cercle $C(O, H)$ contenant les

points A et B , tels que $A (α + L, h)$ et $B (L, h/3)$, la valeur de H est exprimée en fonction de L , h et $α$. En fixant le paramètre L tel que $L = 2 α$, H est déterminé (**Annexes 5**). Le rayon du pignon, R en est ensuite déduit avec l'équation du cercle C en remplaçant x et y par les coordonnées de A ou B :

$$R^2 = x^2 + (y - H)^2$$

Une fois le pignon dimensionné, il faut s'intéresser au rayon, r , de la roue de déplacement. Le déplacement, l , nécessaire est de 6 mm. En fixant un angle de rotation, $θ$, de 40° , le rayon de la roue est obtenu (Figure 5.2).

$$r = l / (\cos \theta - l)$$

Les pièces dimensionnées sont par la suite fabriquées en suivant différentes méthodes. Les pignons et les roues sont dessinés sur le logiciel 3DExpérience, puis exportés sur le logiciel UltimakerCura afin de gérer les paramètres de l'impression 3D (remplissage de 20% et température de 230°). Ils sont ensuite imprimés par l'imprimante 3D Volumic Stream 30 Dual.

La crémaillère est elle aussi dessinée sur 3DExpérience pour être ensuite mise en plan. Le dessin est exporté sur le logiciel BeamStudio pour paramétriser les variables de découpe laser (Acrylique 3mm, Puissance 65, Vitesse 8). La pièce est ensuite découpée par la machine HexaFlux. Par la suite, la crémaillère est faite en métal, grâce à un procédé d'électroérosion par fil.

3.1.5 Dimensionnement du guide de déplacement

Un premier guide de déplacement est créé afin de garantir que le déplacement se fait uniquement en liaison glissière. Après avoir récupéré les dimensions d'un boîtier d'une tête de myosine mécanique, le guide est dessiné sur le logiciel Inkscape. Ensuite le dessin est exporté sur le logiciel BeamStudio et est découpé de la même manière que la crémaillère.

3.2 Méthode de mesure

Une fois que le prototype est correctement mis en marche, la caractérisation de celui-ci est possible. Trois variables sont alors mesurées : la masse, la vitesse maximale, la force maximale sans mouvement. La relation force-vitesse du prototype est déduite des deux

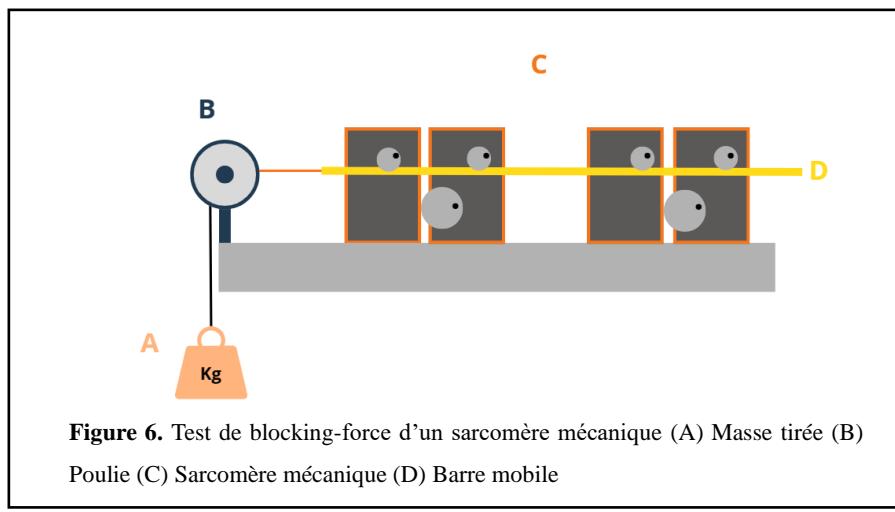
dernières variables citées. Dans cette partie, les méthodes de mesure sont expliquées en prenant le premier prototype comme exemple.

3.2.1 Mesure de la masse d'un prototype

La masse totale du prototype comprend les quatre boîtiers formant les deux têtes de myosine mécanique ainsi que la barre qui les relie. Le prototype est placé sur la balance KERN PCB6000-0 de précision ± 1 g.

3.2.2 Mesure de la force maximale (blocking-force) d'un prototype

La force maximale est mesurée lorsque toutes les cames du prototype sont fermées, bloquant ainsi la barre mobile. Une masse est tenue par cette dernière grâce à un système de poulie (**Figure 6**). Il est à noter les frottements sur la poulie sont négligés. La masse est ensuite augmentée petit-à-petit : lorsque les cames ne sont plus capables de bloquer la barre et la masse, alors la masse maximale est relevée.



Il suffit ensuite de multiplier la masse mesurée par l'accélération de la gravité ($\approx 9,81$) pour obtenir la force maximale.

3.2.3 Mesure de la vitesse maximale d'un prototype

La vitesse maximale est obtenue par essai-erreur en diminuant petit-à-petit les délais présents dans le code entre les différentes étapes sans pour autant altérer le fonctionnement du sarcomère mécanique. Lorsque les délais ne permettent plus un fonctionnement correct du système, les délais de l'essai précédent sont retenus. Il est à noter qu'il y a deux types de

délais, un précédent le mouvement des roues de déplacements, l'autre précédant le mouvement des cames.

3.2.4 Élaboration de la relation Force/Vitesse d'un prototype

La relation force/vitesse du prototype est ensuite établie. La force et la vitesse de chaque essai sont relevées. La force est mesurée grâce à la masse tirée multipliée par l'accélération de la gravité. Ici encore, les frottements de la poulie sont négligés. Pour mesurer la vitesse, deux méthodes sont expérimentées : un temps est relevé à chaque essais pour une distance fixe (M1) ou une distance est relevée pour chaque essais réalisé pendant un temps de passage constant (M2). La deuxième méthode (M2) s'avère plus précise, les mesures étant moins dépendantes de l'opérateur (**Annexe 6**). C'est donc celle-ci qui est retenue pour ensuite tracer la relation force/vitesse à l'aide d'un programme effectué sur Python.

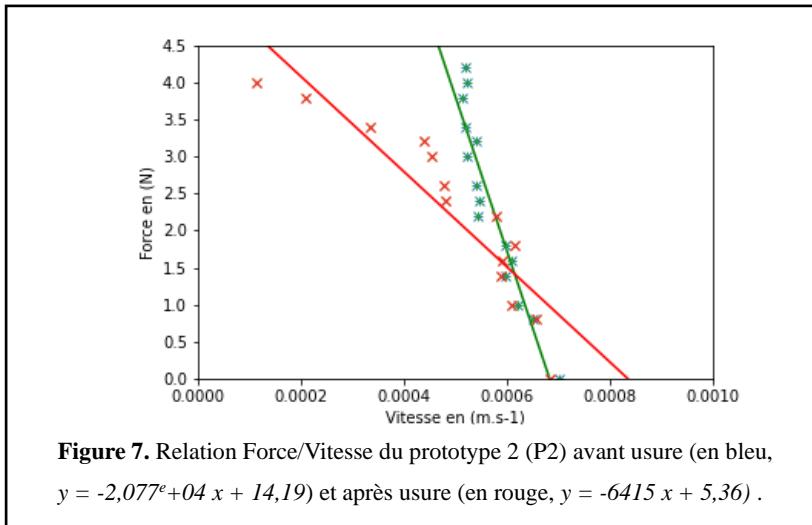
4. Résultats

Le premier résultat observable est que le sarcomère mécanique est fonctionnel et se rétracte (les deux boitiers se rapprochent l'un de l'autre) de la manière attendue. Cependant, le prototype évolue au cours du stage et des nombreux essais. Les mesures évoluent et la comparaison de ces résultats permettent d'optimiser encore les prototypes.

4.1 Mise en évidence du problème d'usure

Le prototype 1 semble de moins en moins performant au cours des essais. Après de nombreux essais, la relation force/vitesse est mesurée à nouveau (**Figure 7**. Essai initial : bleu – RéPLICATION : orange). Il est observable que pour une même force, la vitesse est moindre dans la deuxième condition. Par exemple, pour une force de 4 N, la vitesse dans la deuxième condition est inférieure à 0,2 mm/s tandis que dans la première condition elle est aux alentours de 0,6 mm/s. De plus, le prototype n'est plus capable de porter autant qu'avant : sa force maximale est de 4 N contre plus de 6 N avant (**Figure 7**).

Un réel problème d'usure est donc envisagé, lié au frottements des cames sur la barre mobile mis en évidence par expérience sur la **Figure 7**. Les cames sont creusées et polies et bloquent moins bien la barre. Ce problème est une des raisons de l'amélioration pignon/crémaillère présentée auparavant.



4.2 Apport du système pignon/crémaillère

Le système pignon/crémaillère est créé pour pallier les problèmes d'usures et pour se rapprocher encore plus du modèle de fonctionnement du muscle. Ce dernier modifie les variables mesurées pour la caractérisation du prototype.

4.2.1 Différence de force maximale, vitesse maximale et masse totale

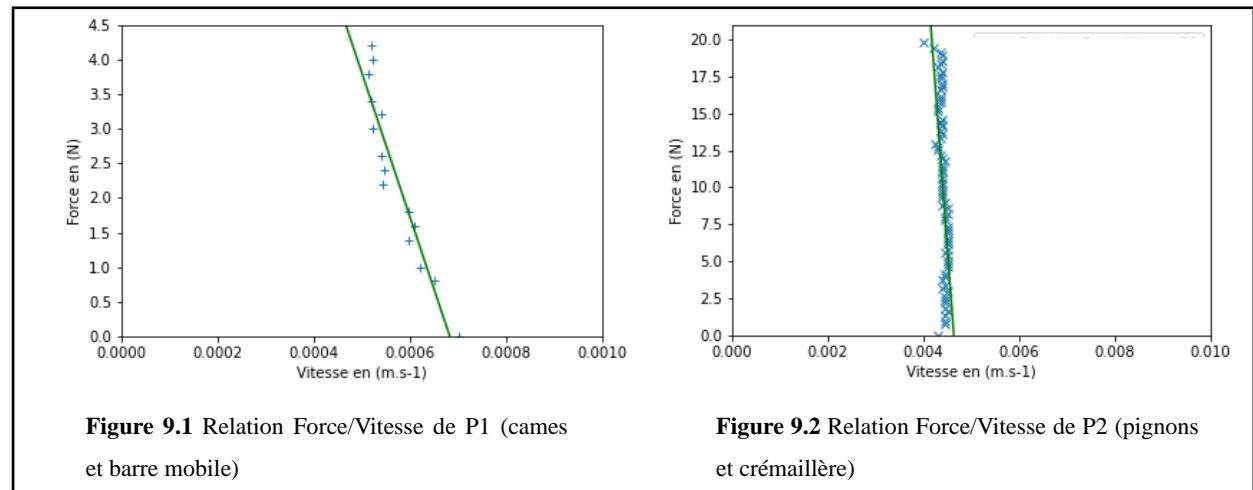
	P1 : cames et barre mobile	P2 : pignons et crémaillère en plastique
Délais minimaux	270 ms	130/180 ms
Vitesse maximale	0,74 mm/s	4,45 mm/s
Force maximale	88,29 N	39,97 N
Masse totale	362 g	631 g

Figure 8. Tableau comparatif des caractéristiques de premier prototype P1 et de son évolution P2

Avec le système pignons/crémaillère, les délais présents dans le code Arduino (**Annexe 1**) dans le but d'espacer les mouvements des servomoteurs et ne pas saturer le système, sont diminués. Il est à noter que cette amélioration est obtenue en différenciant le délai avant le mouvement de la roue de déplacement et celui précédent le mouvement des pignons. Elle n'est donc pas directement liée au système pignon/crémaillère mais permet tout de même de fortement augmenter la vitesse maximale en passant de 0,74 mm/s à 4,45 mm/s, et ce même avec une masse deux fois plus élevée (passant de 362 g à 631 g). Cependant, la force

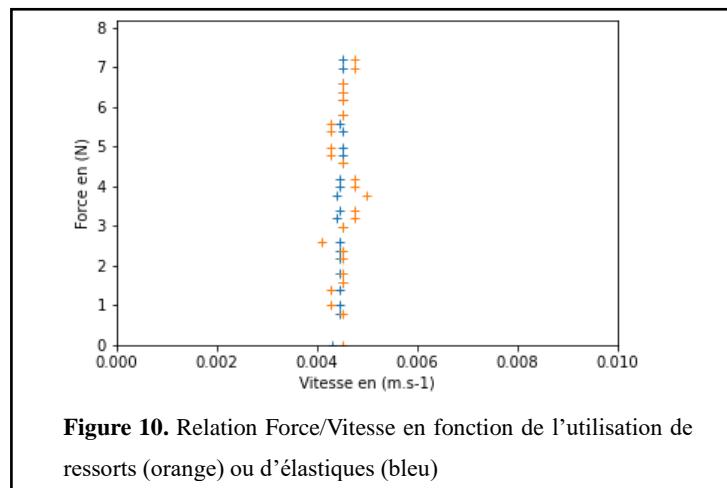
maximale supportée est diminuée de moitié, passant de 88,29 N à 39,97 N en blocking-force. Ceci est dû à la casse de la crémaillère en plastique, cette dernière ayant des crans trop fins, de 3 mm de hauteur et de 2 mm de largeur.

4.2.2 Différence de relation force/vitesse



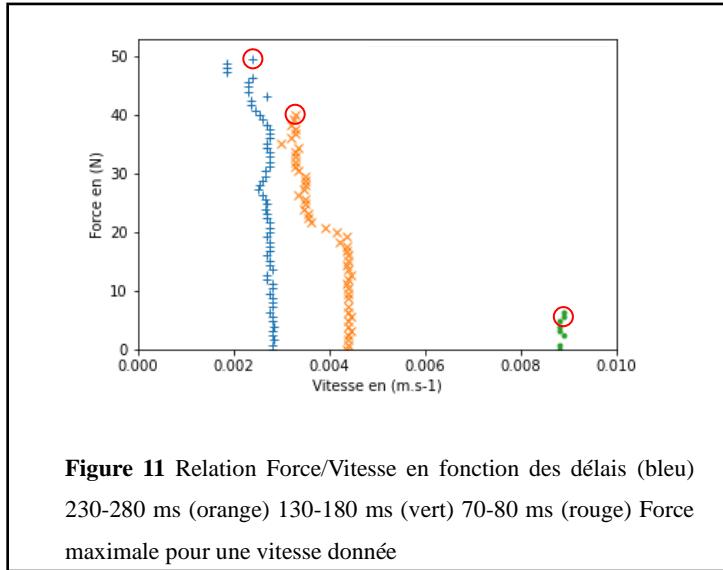
Le système pignons/crémaillère modifie la relation force/vitesse du prototype. Avec le premier prototype, la vitesse de ce dernier dépendait de la force tirée (**Figure 9.1**). En effet, au plus la force tirée est faible, au plus la vitesse est élevée. Cette dernière est aux alentours de 0,7 mm/s lorsque la force est nulle mais diminue drastiquement (0,2 mm/s) pour une force tirée de 6 N. Avec le deuxième prototype, la vitesse dépend moins de cette force, elle reste à peu près la même (aux alentours de 4,5 mm/s) que la force vaille 2 N ou 20 N (**Figure 9.2**). Aux vues de cette différence assez fondamentale, pour la suite des résultats, les prototypes étudiés ne seront que des prototypes équipés du système pignon/crémaillère. Il est à noter que le changement de types de crémaillère (de la crémaillère en plastique à celle en métal) n'a aucun effet sur la relation force/vitesse. Cependant, la crémaillère en métal se cassant moins vite, la force maximale tenue est améliorée (91,95 N pour que cette dernière limite en flexion alors 39,97 N entraîne la casse de celle en plastique).

4.3 Apport des ressorts



L'apport des ressorts ne modifie pas significativement les variables de la caractérisation étudiée. En effet, la relation force/vitesse du prototype avec les élastiques et celle de celui avec le ressort est quasiment identique et semblent se superposer.

4.4 Modifications des délais et apport d'un nouveau générateur



Les délais choisis jouent sur la vitesse du prototype comme expliqué auparavant. C'est en modifiant cette variable que la relation force-vitesse est obtenue. En effet, en modifiant les délais et donc la vitesse du prototype, la force portée par le prototype change aussi (**Figure 11**) : lorsque la vitesse de celui-ci est la plus rapide (0,009 m/s environ) le poids maximale qu'il peut tirer est inférieur à 10 N tandis qu'avec des délais plus long, le prototype arrive à porter 50 N.

Il est à noter que ces écarts de vitesse à charge fixée sont possibles uniquement grâce à l'apport d'un nouveau générateur alimentant seulement les roues de déplacement. Cela s'explique par le fait que les servomoteurs utilisent une intensité de courant de 190 mA lorsqu'ils tournent à vide pour une tension courante de 6 V, où un générateur délivrant une puissance de 18 W est suffisant (la puissance nécessaire pour les 6 servomoteurs étant de 0,684 W). Cependant, lorsque ces derniers doivent supporter une charge, les servomoteurs ont un courant de calage de 1,5 A. Il faudrait alors une puissance de 54 W pour couvrir les besoins des six supportant le poids simultanément. Tous les servomoteurs ne bloquent pas la crémaillère en même temps et ne demande pas une intensité de courant élevée en même temps. De plus, lorsque les délais sont élevés, les mouvements de chaque servomoteur sont

bien séparés et la puissance d'un générateur suffit toujours. En revanche, lorsque la vitesse de mouvement est augmentée, les mouvements des servomoteurs se superposent ce qui demande plus de puissance : un générateur de 18 W ne suffit alors plus. L'ajout d'un générateur permet donc d'augmenter la vitesse de mouvement en réduisant les délais sans limite de puissance du système au global. De la même manière, à vitesse fixée, cela permet d'augmenter la charge supportée.

5. Discussion

L'objectif du stage est de caractériser et optimiser un prototype d'actionneur bio-inspiré du muscle, imitant la structure multi-échelle de ce dernier afin de s'approcher au maximum de ces caractéristiques. Ceci a pour but de créer un actionneur résilient et d'avoir un modèle mécanique du muscle permettant de tester différentes variables de celui-ci. Ces deux mois ont permis d'avoir un sarcomère mécanique fonctionnel, dont les deux têtes de myosine mécaniques se rapprochent.

De nombreuses améliorations sont faites dans le but que les deux têtes se rapprochent de la manière la plus efficiente possible, en limitant par exemple au maximum les problèmes d'usure par l'ajout du système pignon/crémaillère. Il est nécessaire ici de se questionner sur l'efficacité de l'ajout des ressorts, du nouveau générateur ou encore de la modification des délais et pourquoi, dans certains cas, cela n'a pas d'impact significatif sur le prototype.

L'ajout des ressorts n'a pas réellement modifié les caractéristiques du prototype. Cela peut s'expliquer par le fait que les élastiques permettent déjà un bon retour élastique entre les deux têtes de myosine bio-inspirée. Cependant, la raideur des élastiques est inconnue et très variable d'un essai à l'autre. En effet, ces derniers se cassent facilement et n'étant pas fixes sur les boitiers, ils ne permettent pas d'être dans de bonnes conditions de caractérisation et de répétabilité des résultats. De plus, les élastiques, contrairement aux ressorts, n'ont pas de domaine linéaire ce qui est un problème pour la modélisation. Les ressorts fixés sur les têtes de myosine sont donc nécessaires, même sans améliorer les performances du prototypes en elles-mêmes. Ils sont précisément dimensionnés pour éviter que les boitiers effectuent une rotation autour de l'axe vertical. Les ressorts permettent donc de limiter la variabilité entre les essais et d'augmenter le contrôle, la connaissance de chaque variable du sarcomère, ce qui est indispensable pour les objectifs de l'étude.

L'ajout du générateur impacte les performances du prototype. Il modifie toutes les variables de la caractérisation à part la blocking-force, qui est mesurée à l'arrêt avec tous les pignons fermés. Le deuxième générateur permet d'atteindre la vitesse maximale grâce à une importante diminution des délais, comme il est mentionné dans la partie résultat. Cette vitesse obtenue est même la vitesse maximale du prototype, dont laquelle la seule limite est le temps de mouvement des composants et non plus la puissance. En effet, avec le générateur supplémentaire, chaque servomoteur a plus de puissance disponible lors de son mouvement, ce qui permet d'accélérer l'ensemble du mouvement jusqu'à cette vitesse maximale.

Il faut tout de même remarquer que plus la vitesse augmente, moins la charge maximale portée est importante (**Figure 11**). Cela semble dans un premier temps en accord avec la relation force/vitesse du muscle strié squelettique proposé par *Hill* (1938). En effet, lors d'une contraction musculaire isotonique, la vitesse de mouvement dépend de la force subit et inversement. Plus la vitesse est élevée, plus la force diminue et plus la force augmente, plus la vitesse est diminuée. Le prototype semble donc respecter les propriétés contractiles du muscle strié squelettiques, et tendre à devenir une maquette de celui-ci. Il faut tout de même considérer le fait que les seuls trois points visibles sur la **Figure 11** dégagent cette tendance mais ne permettent pas d'affirmer totalement cette caractéristique. D'autant plus qu'il n'est pas possible avec ces données de conclure si la relation est linéaire ou non. *Hill* mentionne tout de même que la relation force-vitesse est connue pour ne pas être linéaire et questionne le rôle de la viscoélasticité dans ce phénomène.

Or, le prototype obtenu n'a pas les propriétés élastiques du muscle. Il n'a pas de réelle « enveloppe » entourant le sarcomère mécanique et ne revient pas à sa longueur initiale à la fin de son mouvement. Bien que le guide actuel aide au déplacement de celui-ci, il n'empêche en rien le déplacement verticaux parasites des boitiers ou encore les déplacements antéro-postérieurs de ces derniers. De plus, il n'est pas aussi capable de se rétracter et de se détendre suivant le cours du mouvement du prototype d'actionneur. Ce sont pourtant des propriétés intrinsèques au muscle strié squelettique, qui conditionnent leurs mouvements et contractions et qui sont donc nécessaires de répliquer dans le but d'élaborer la maquette de celui-ci. D'autres améliorations et réflexions sont donc à apporter. Un ressort au milieu des quatre têtes de myosine bio-inspiré va être placé pour effectuer le retour à la longueur initiale. En revanche, il est plus compliqué de créer une enveloppe rétractable, ayant les mêmes propriétés que le sarcolemme. Pourtant, celui-ci joue un rôle centrale dans le fonctionnement du muscle

strié squelettique ou dans sa structure (*Campbell and Stull, 2003*). Enfin, il est nécessaire de trouver la manière de modéliser les costamères, des protéines interagissant entre le sarcolemme et les cellules contractiles, dans le but de maintenir ce dernier aligné aux sarcomères voisins, protéger la membrane des dommages induit par la contraction et de transmettre certaines forces de contraction et qui sont donc indispensables dans le bon fonctionnement du muscle.

Le retour à la longueur initiale du sarcomère mécanique et la création de son sarcolemme bio-inspiré sont les prochaines étapes dans la conception de la maquette du muscle strié squelettique. Lorsque le prototype aura ces caractéristiques tout en étant toujours fonctionnel, il pourra être dupliqué dans le but d'être assemblé pour créer l'actionneur bio-inspiré pour ensuite tester sa résilience.

6. Conclusion et Perspectives

Le prototype évolue et est amélioré de jour en jour. C'est aujourd'hui un prototype fonctionnel, permettant un déplacement en portant des charges. Cependant, de nombreuses améliorations restent nécessaires pour atteindre tous les objectifs initiaux. Faire de ce prototype un modèle mécanique précis du muscle, permettant d'étudier précisément ses caractéristiques semble pour le moment hors d'atteinte. Il est à noter que si l'actionneur réalisé n'est pas assez proche de la réalité du muscle pour en faire un modèle mécanique, cela n'empêche pas forcément le succès du deuxième objectif : avoir un actionneur résilient. Cette propriété sera testée par la suite, après la réplication de la version la plus aboutie du prototype.

7. Bibliographie

J.Zhang et al. (2019) Robotic Artificial Muscles: Current Progress and Future Perspectives
IEEE Transactions on Robotics Volume: 35, Issue: 3, June 2019

R. Perrier, L. Tadrist, J.M. Linares (2022) Damage resilience of manufactured and biological actuators. *Bioinspiration and Biomimetics*, 2022, 18 (1), pp.016006.

C. Nicol, J. Avela and P. V. Komi (2006) The Stretch-Shortening Cycle A Model to Study Naturally Occurring Neuromuscular Fatigue *Sports Med* 2006; 36 (11): 977-999

J. Squire (2019) Special Issue: The Actin-Myosin Interaction in Muscle: Background and Overview *Int. J. Mol. Sci.* 2019, 20(22), 5715

M. Narici¹, M. Franchi and C. Maganaris (2016) Muscle structural assembly and functional consequences *Journal of Experimental Biology* 219, 276-284

C. Cohen, et al. (2015) Weightlifting and the actomyosin cycle. *Proc. R. Soc. A* 471: 20150473.

A. V. Hill (1938) The heat of shortening and the dynamic constants of muscle, *Section of Biophysics, Department of Physiology, University College, London*, 612.745

K. P. Campbell and J. T. Stull (2003) Skeletal Muscle Basement Membrane-Sarcolemma-Cytoskeleton Interaction Minireview Series, *The Journal of Biological Chemistry* Vol. 278, No. 15, Issue of April 11, pp. 12599–12600

9. Annexe(s)

Annexe 1 : Programme induisant le déplacement du sarcomère

1. Définition des délais et des servomoteurs

```
#define UPDATE_TIME_1 130
#define UPDATE_TIME_2 180
#define UPDATE_TIME_3 5000

// servoPin1
int servoPin1 = 15;
int ferme1 = 50;
int ouvert1 = 70;
```

2. Initialisation des servomoteurs

```
void setup() {

    // Code initialisation (sortie)
    pinMode(servoPin1, OUTPUT);
    pinMode(servoPin2, OUTPUT);
    pinMode(servoPin3, OUTPUT);
    pinMode(servoPin4, OUTPUT);
    pinMode(servoPin5, OUTPUT);
    pinMode(servoPin6, OUTPUT);
```

3. Etapes du mouvement

```
void loop() {

    // Etape 1
    PWM(servoPin3, ferme3);
    delay(UPDATE_TIME_1);
    PWM(servoPin1, ouvert1);
    PWM(servoPin2, ouvert2);
    delay(UPDATE_TIME_1);
    PWM(servoPin6, ferme6);
    PWM(servoPin5, ouvert5);
    delay(UPDATE_TIME_1);
    PWM(servoPin4, ouvert4);

    // Etape 2
    PWM(servoPin1, ouvert1);
    delay(UPDATE_TIME_2);
    PWM(servoPin2, ferme2);
    PWM(servoPin3, ferme3);
    PWM(servoPin6, ferme6);
    delay(UPDATE_TIME_2);
    PWM(servoPin5, ferme5);
    PWM(servoPin4, ouvert4);
    delay(UPDATE_TIME_1);

    // Etape 3
    PWM(servoPin1, ferme1);
    PWM(servoPin2, ferme2);
    delay(UPDATE_TIME_1);
    PWM(servoPin3, ferme3);
    PWM(servoPin6, ferme6);
    PWM(servoPin5, ferme5);
    delay(UPDATE_TIME_1);
    PWM(servoPin4, ferme4);

    // Etape 4
    PWM(servoPin1, ferme1);
    PWM(servoPin2, ferme2);
    delay(UPDATE_TIME_1);
    PWM(servoPin3, ouvert3);
    delay(UPDATE_TIME_1);
    PWM(servoPin6, ouvert6);
    PWM(servoPin5, ferme5);
    PWM(servoPin4, ferme4);

    // Etape 5
    PWM(servoPin1, ferme1);
    delay(UPDATE_TIME_2);
    PWM(servoPin2, ouvert2);
    PWM(servoPin3, ouvert3);
    PWM(servoPin6, ouvert6);
    delay(UPDATE_TIME_2);
    PWM(servoPin5, ouvert5);
    PWM(servoPin4, ferme4);
    delay(UPDATE_TIME_1);
```

4. Définition des fonctions

```
// Déclaration sous-fonction

void PWM(int pin, int angle) {
    digitalWrite(pin, HIGH);
    delayMicroseconds(convertirAngleEnImpulsion(angle));
    digitalWrite(pin, LOW);
}

int convertirAngleEnImpulsion(int angle) {
    float a = 1500.0/180.0;
    float b = 500;
    return int (a*angle + b);
}
```

Annexe 2 : Machine d'état

La machine d'état reprend les fonctions de base vue dans le programme de déplacement ci-dessous et les programmes de fermetures et d'ouverture des pignons reprenant le même principe.

```
// Initialisation de l'état courant
STATE currentState = OUVERT;
```

2. Etapes de la machine d'état

```
void loop() {
    // Vérification disponibilités des données
    if(Serial.available()){
        char command = Serial.read();

        switch (command){
            case 'O' :
                performEvent(EVENT_OUVERT);
                break ;
            case 'F' :
                performEvent(EVENT_FERME);
                break ;
            case 'C' :
                performEvent(EVENT_CYCLE);
                break ;
            case 'S' :
                performEvent(EVENT_STOP);
                break ;
        }
    }
}
```

3. Définition de la fonction évènement

```
void performEvent(EVENT event) {
    switch (currentState){
        case OUVERT :
            if(event == EVENT_FERME) {
                // fermeture du système
                programme_ferme();
                currentState = FERME;
            }
            break;

        case FERME :
            if(event == EVENT_CYCLE) {
                // mise en mouvement du système
                programme_sarco2();
                currentState = CYCLE;
            }
            break;
    }
}

case CYCLE :
    if(event == EVENT_STOP) {
        // Arrêt du système
        programme_ferme();
        currentState = STOP;
    }
    break;

case STOP :
    if(event == EVENT_OUVERT) {
        // Ouverture du système
        programme_ouvert();
        currentState = OUVERT;
    }
    break;
```

Annexe 3 : Bilan des moments pour dimensionner les ressorts

On a $F1 = F2 = k*l$ et $F3 = K*l$ (A)

L'origine est k2 ($O = k2$).

On connaît le centre de gravité OG tel que :

$$kO1 + kO2 + kO3 = (2k + k)*OG$$

On obtient par rapport au vecteur ex : $K*(x + X) = (2k + K)*x$ d'où $k/K = X/2x$ (B)

On calcule k en fonction de l et $F1$ sachant que l est mesuré avec une règle et $F1$ est supérieur au poids d'une tête de myosine.

$F1 = 3,58 \text{ N}$ et $l = 0,058 \text{ m}$

En reprenant de la formule (A), on obtient $k = 61,72$.

On mesure X et x à l'aide d'une règle.

$X = 0,053 \text{ m}$ et $x = 0,008 \text{ m}$

En reprenant de la formule (B), on obtient $K = 18,63$.

Annexe 4 : Calcul du nombre de spires des ressorts

$$n = (G*d^4) / (8*R*D^3)$$

avec n le nombre de spires utiles, G le module de torsion (en N/mm²), d le diamètre du fil (en mm), D le diamètre moyen (en mm) et R la raideur du ressort (en N/mm²)

Le nombre total de spires $NT = n + 2$.

NT est calculé pour le cuivre ($G = 124$), l'acier ($G = 220$) et le laiton ($G = 130$) pour k et K .

	K	k
Cuivre	84	26
Acier	148	45
Laiton	88	27

Annexe 5 : Calcul de H pour trouver le rayon de mouvement des pignons

On prend un cercle de centre O tel que $O(0, H)$

On obtient donc : $R^2 = x^2 + (y - H)^2$ (C)

On a les points tels que $A(\alpha + L, h)$ et $B(L, h/3)$

Les deux points appartiennent au cercle de centre O.

$$(\alpha + L, h)^2 + (h - H)^2 = L^2 + (h/3 - H)^2$$

On en déduit donc H puis en reprenant la formule (C), on en déduit R.

$R = 21,38 \text{ mm}$

Annexe 6 : Comparaison des méthodes de mesure

