



Rapport présenté en vue de l'obtention du
MASTER 1 IEAP
Parcours
BIO-INGENIERE DES TISSUS ET DES IMPLANTS

Institut des Sciences du Mouvement
Equipe de Conception bio-inspirée

Dimensionnement des muscles en vue de la conception
d'un actionneur bio-inspiré

Présenté par
PANNIER Dylan

Sous la direction de
TADRIST Loïc

Année 2020-2021

L'architecte du futur construira en imitant la nature, parce que c'est la plus rationnelle, durable et économique des méthodes. "Antonio Gaudi

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Loïc TADRIST, qui a été mon tuteur durant ces deux mois. Il m'a accueilli au sein de l'équipe de conception bio-inspirée et a su, malgré les conditions sanitaires actuelles ne permettant pas le présentiel au sein du laboratoire, maintenir un contact hebdomadaire régulier, permettant ainsi de garder une certaine motivation concernant le sujet de recherche. Je le remercie également d'avoir su m'aider lorsque besoin était, que ce soit pour la compréhension d'un aspect du sujet, ou bien même lors de difficultés techniques.

Je tiens également à remercier tous les membres de l'équipe CBI qui ont su m'accueillir et faire de moi une partie intégrante de l'équipe. Ils ont su rester ouverts aux discussions et aux partages de leurs points de vue.

Table des matières

Remerciements.....	2
1. Introduction	4
1.1. Présentation de la structure d'accueil.....	4
1.2 Contexte	4
1.3 Missions	4
2. État de l'art	5
2.1 La bio-inspiration en quelques mots	5
2.2 Fonctionnement du muscle.....	5
2.3 Propriétés fonctionnelles du muscle.....	7
2.4 Fibres musculaires.....	8
.....	8
.....	8
2.5 La structure musculaire	9
2.6 Allométrie.....	11
3 Problématique.....	12
3.1 Hypothèses	12
4. Matériels et méthodes.....	12
4.1 Littérature	12
4.2 Traitement et analyse des résultats	13
5. Résultats.....	14
5.1 Distribution de fibres lentes et rapides (I, II).....	14
.....	14
5.2 Longueurs des fibres des muscles locomoteurs	15
.....	15
5.3 Evolution de la masse musculaire	16
5.4 PCSA et force isométrique	17
5.5 Relation force/longueur de fibre	19
6 Discussion et limites.....	20
7 Conclusion.....	21
8 Conclusion personnelle.....	21
Annexe I.....	23
Bibliographie.....	24
Articles et revues utilisés dans la base de données :.....	26

1. Introduction

1.1. Présentation de la structure d'accueil

Ma mise en situation professionnelle s'insère dans le cadre de la recherche au sein de l'Institut des Sciences du Mouvement (ISM), basé sur le campus de Luminy à l'Université d'Aix-Marseille. L'antenne dans laquelle s'est déroulé mon stage est, elle, basée à l'Institut Universitaire Technologique d'Aix-en-Provence dans l'équipe de conception bio-inspirée (CBI, Bio Inspired Design).

1.2 Contexte

L'objectif ici, est de répondre à des problématiques industrielles liées à la conception de vérins. Utilisés dans de nombreux équipements et pour des applications variées, ces actionneurs présentent des points faibles tels que la résilience, permettent des mouvements trop rigides et nécessitent également un entretien indispensable et fréquent. C'est pour cela que l'équipe CBI de l'ISM cherche à s'inspirer des actionneurs (muscles) du vivant afin d'apporter des solutions technologiques innovantes. Elle cherche à concevoir un actionneur s'inspirant de la structure (microscopique et macroscopique) ainsi que du principe de fonctionnement d'un muscle. Pour cela, il est au préalable nécessaire de recenser et d'étudier les muscles de différentes espèces afin de comprendre l'évolution musculaire de ces dernières.

1.3 Missions

Les missions confiées s'articulent autour de l'architecture et des propriétés musculaires que l'on peut retrouver chez différents animaux. Il est ainsi demandé de savoir expliquer le fonctionnement du muscle ainsi que ses différents composants. A la suite de cela, un travail conséquent de recherche bibliographique est demandé dans le but de recenser les différentes propriétés musculaires chez les animaux, définies dans la littérature. A la suite de ce classement dans une base de données, il est demandé de comprendre les tendances observées dans l'architecture des différents muscles et d'essayer d'en comprendre les raisons biomécaniques.

2. État de l'art

2.1 La bio-inspiration en quelques mots

A la suite de millions d'années d'évolution, les animaux ont développé des structure et fonctions « presque » parfaites. « Presque » car on ne retrouve pas seulement des solutions optimales, mais certaine, comme par exemple, les nageoires pour le déplacement chez les poissons, ou bien même les long membres supérieurs de certains primates pour faciliter le balancement. Depuis quelques années maintenant, les chercheurs et ingénieurs s'inspirent des insectes et des animaux pour répondre aux besoins d'aujourd'hui. On retrouve par exemple les ailes de papillons pour leur capacité hyper-hydrophobe, la fourrure de l'ours polaire pour ses propriétés optiques et isolantes ou encore la toile d'araignée pour ses propriétés mécanique et sa mémoire de forme (*Liu, K., & Jiang, L. 2011*). Aujourd'hui, de nombreuses propriétés issues de créatures sous-marines, terrestres et aériennes sont à l'origine de nouveaux concepts et procédés.

2.2 Fonctionnement du muscle

Il nous est souvent tenu pour acquis le fait de se mouvoir, de se déplacer au quotidien et ce, sans réellement comprendre la mécanique et la physiologie derrière un geste. Nous allons donc, dans un premier temps introduire le muscle strié, ses différentes déclinaisons ainsi que son fonctionnement.

On retrouve ci-dessous, en figure 1, une coupe transversale d'un muscle (le biceps dans le cas présent) pour s'intéresser à sa structure microscopique. On observe que le corps du muscle est entouré d'une couche appelée épimysium. Cette couche, tout comme l'endomysium et le périmysium sont des enveloppes de tissus conjonctif qui serviront à former le tendon au niveau des insertions et terminaisons.

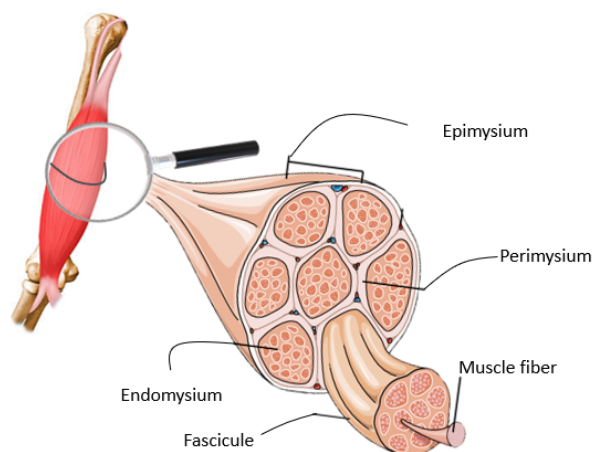


Figure 1 Coupe transversale du muscle (Cohen, C et al., 2015)

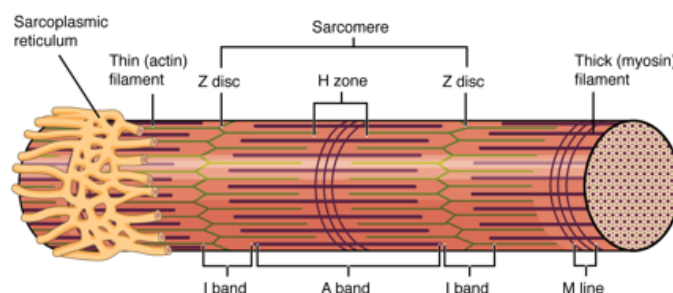


Figure 2 Représentation du sarcomère (Cohen, C et al., 2015)

A l'intérieur de ce corps musculaire se trouvent plusieurs fascicules entourés du pérимыsium vu précédemment. Un petit fascicule se décline ensuite en fibres musculaires qui sont remplies de filaments appelés myofibrilles. Ce sont ces segments qui sont à l'origine de la contraction musculaire. En effet, au sein de ces myofibrilles se trouvent plusieurs segments, ou plutôt unités, répétées le long de la fibre. C'est le sarcomère que l'on retrouve en figure 2. Il représente l'unité contractile du muscle. Lors de la contraction musculaire, plusieurs mécanismes se mettent en place.

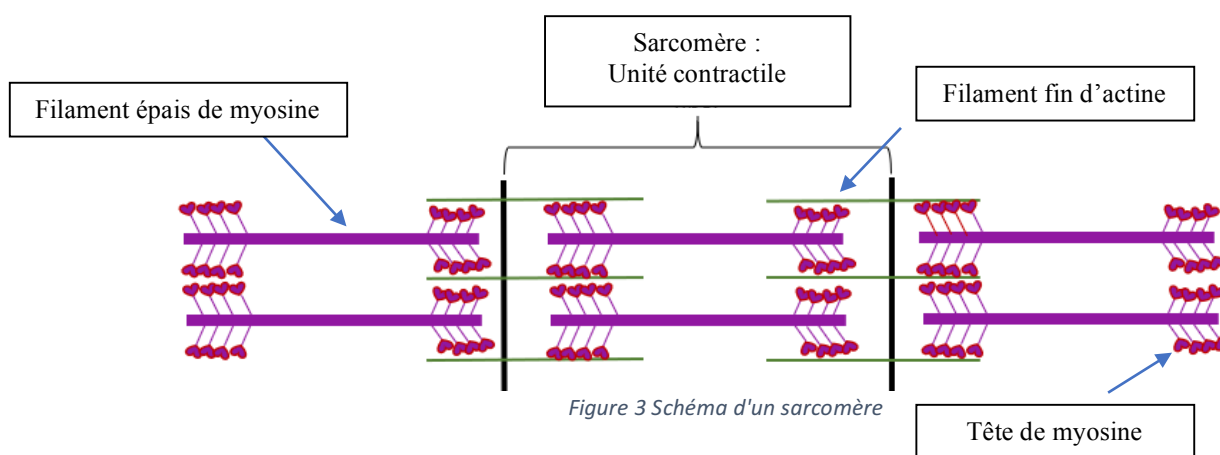
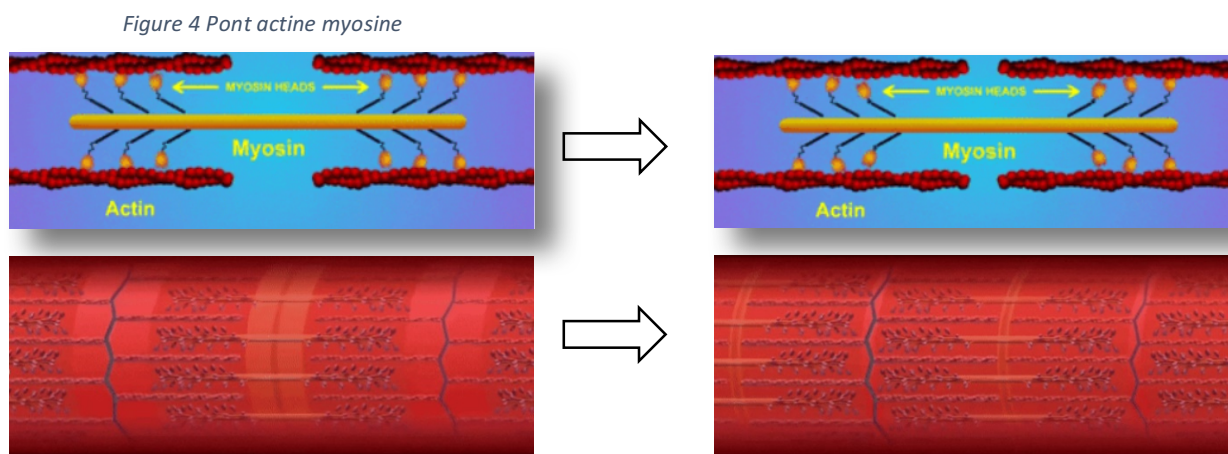


Figure 3 Schéma d'un sarcomère

Lors de l'envoi d'un stimulus par le système nerveux, ce dernier va passer par le réticulum sarcoplasmique (réseau de cavités permettant le stockage de calcium, (Tupling, A. R. 2004)) et longer les liaisons tubulaires appelées « T-tube » ce qui entraîne la libération d'ions calcium Ca^{2+} et permet la contraction du sarcomère. Ci-dessus, en figure 3, une représentation schématique du sarcomère est présentée. Le sarcomère est principalement composé de deux filaments, le filament fin d'actine (vert) et le filament épais de myosine (violet). Lors de la libération du calcium, les têtes de myosine, ici en rouge vont se lier aux filaments d'actine et

former un pont, c'est le pont d'actine myosine (*Cohen, C et al., 2015*). Les têtes de myosine vont entraîner, pas à pas, par séquences d'attachement et de détachements, les filaments d'actine vers le centre du sarcomère. Ces ponts vont donc entraîner le raccourcissement des sarcomères, donc de la fibre et du muscle au niveau macroscopique. Ci-dessous en figure 4 et 5, les rapprochements des sarcomères.



2.3 Propriétés fonctionnelles du muscle

Aujourd'hui, deux paramètres sont connus et étudiés pour déterminer les propriétés fonctionnelles d'un muscle. La composition en type de fibres musculaire ainsi que son architecture (*Bodine et al., 1982; Bottinelli et al., 1991; Powell et al., 1984; Reiser et al., 1985*).

Les muscles squelettiques sont composés de différentes fibres musculaires différenciées par certaines de leurs caractéristiques (*Scott, W., & al., 2001*). Trois types de fibres ont été classées par leur diamètre, leur densité capillaire, leur densité mitochondriale. Ces mitochondries sont responsables de la production d'ATP (adénosine triphosphate) (*Tarasov, A. I & al., 2012*), ainsi que leur composition en chaîne lourde de myosine (MHC, Myosin Heavy Chain). C'est cette dernière propriété qui est la plus utilisée et la plus pertinente pour identifier les différentes fibres musculaires. (*Pette, D et al., 2000*). La composition en MHC est quantifiée par l'activité ATPase. La myosine ATPase est une enzyme liée aux têtes de myosine permettant l'hydrolyse de l'ATP. Elle permet ainsi aux ponts actine myosine de se coupler et se découpler, rapprochant ainsi les extrémités des sarcomères en son centre. Il a été montré que l'activité de l'ATPase est directement liée à la vitesse de contraction d'une fibre. (*Bárány, M. 1967*). Plus l'activité est importante, plus rapide est la contraction.

2.4 Fibres musculaires

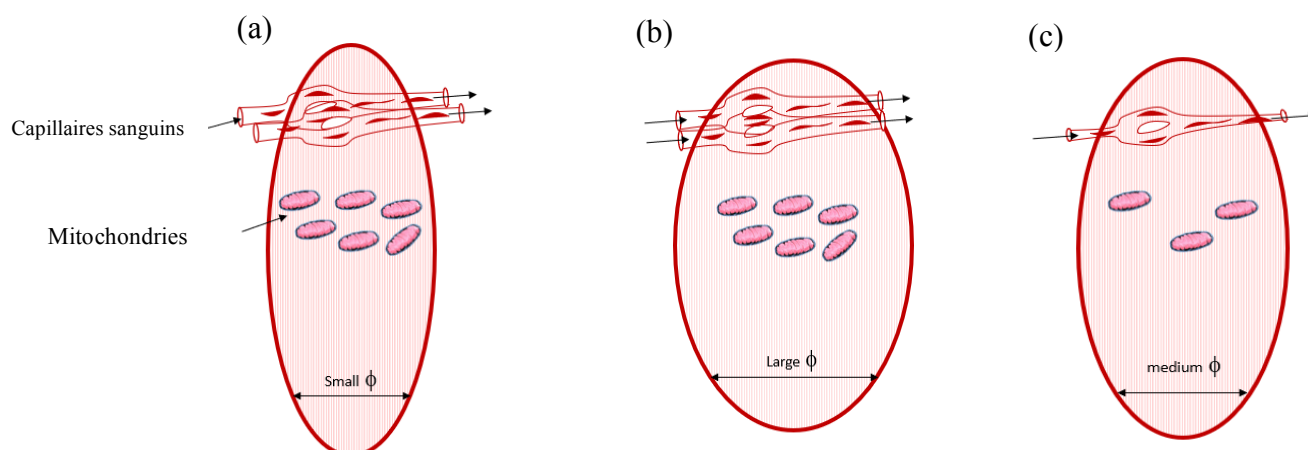


Figure 6 Typologie des différents types de fibres I a) ; II.a (b) et II.x (c)

Les figures a.b et c représentées ci-dessus sont les trois grandes familles de fibres. La fibre de type I aussi appelée fibre oxydative lente (SO), II.a ou fibre oxydative et glycolytique rapide (FOG) puis II.x ou fibre glycolytique rapide (**Kohn et al., 2011**) de gauche à droite respectivement. Leurs propriétés sont résumées dans le tableau ci-dessous.

	Fibres		
Propriétés	I	II.a	II.x
Structure	Rouge Petit diamètre Haute densité capillaire Haute densité mitochondriale	Rouge/rose Large diamètre Haute densité capillaire Haute densité mitochondriale	Blanc Diamètre moyen Faible densité capillaire Faible densité mitochondriale
Metabolisme	Aérobique ↘ Activité ATPase Faible vitesse contractile Très résistante à la fatigue (heures) Produit peu de force Recrutée en premier	Aérobique ↗ Anaérobique ↗ Activité ATPase Haute vitesse contractile Résiste moyennement à la fatigue Production de force modérée Recrutée en deuxième	Anaérobique ↗ Activité ATPase Haute vitesse contractile Peu résistante à la fatigue Grande production de force Recrutée en dernier
Fonction	Marathons Muscles anti-gravité	Sprints Marche à pied	Soulevé de charge Effort de force intense

Selon une étude de **O'Neill, M. C et al**, parue en 2017, la distribution de fibres lentes (Slow Twitch) au sein des muscles locomoteurs augmente avec la masse de l'animal sans y

faire apparaître de loi allométrique quelconque. Cependant, certaines espèces, l'Homme y compris, possèderaient une prédominance de fibres I au sein de leur membres inférieurs.

2.5 La structure musculaire

Concernant la structure du muscle, ce sont les dimensions des fibres mais également leur orientation qui aura pour conséquence une haute vitesse de contraction ou une production de force plus importante.

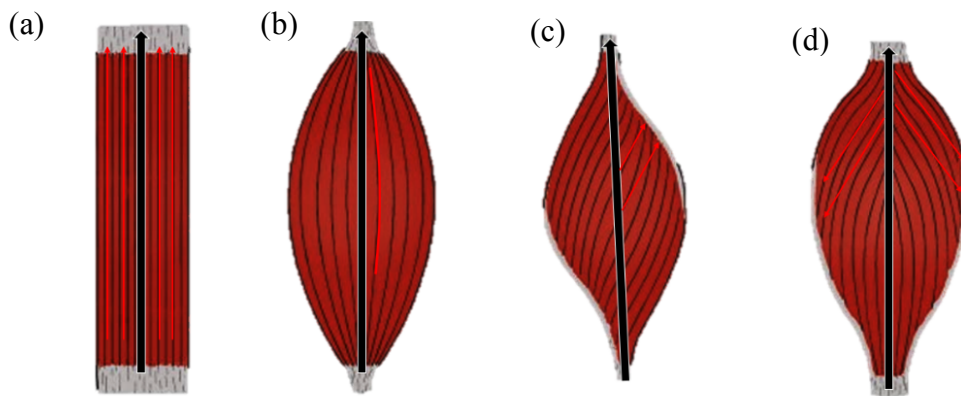


Figure 7 Représentation schématique des types de muscle : Parallèle, fusiforme, unipenné et bipenné a), b), c) et d) respectivement.

Les différentes figures ci-dessus représentent les différents types d'architectures musculaire. La majeure différence entre ces muscles est l'insertion de la fibre, ou plus précisément l'angle de pennation qui indique l'angle auquel s'insère la fibre (en rouge) par rapport à l'axe de force du muscle qui correspond à l'aponévrose (flèche noire). On retrouve le muscle à fibres dites « parallèles », le muscle fusiforme, le muscle unipenné puis le muscle bi ou multi-penné respectivement de gauche à droite, figure 7.

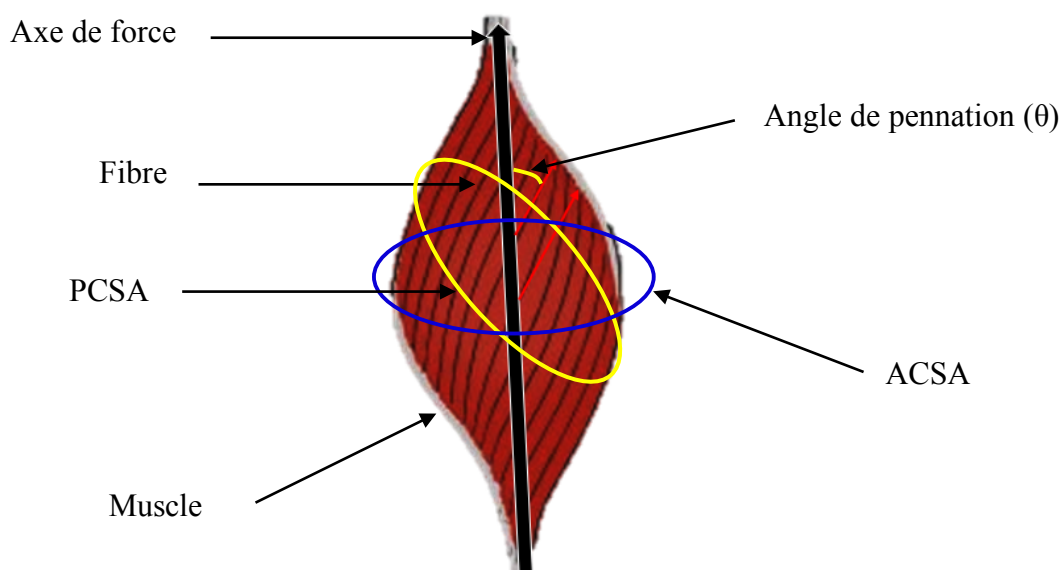


Figure 8 Représentation schématique des grandeurs associées au muscle

Ces différentes structures vont avoir une influence sur deux paramètres en particulier. l'anatomical cross section area ACSA et le PCSA, physiological cross section area. L'ACSA correspond à la surface de fibres contenue dans un coupe transversale au muscle, autrement dit, perpendiculairement à l'axe de force (Aponévrose, flèche noire). Le PCSA au contraire, est la surface de fibres contenue dans une coupe perpendiculaire aux fibres musculaires (**Gans & Bock, 1965**). Cette mesure est plus représentative du nombre de fibres réel présent dans le muscle. Par conséquent, dans un muscle non-penné ACSA = PCSA, contrairement au muscle penné où le PCSA est supérieur à l'ACSA. (**Rutherford, O. M., & Jones, D. A., 1992**). Il est cependant difficile de mesurer le nombre exact de fibres ainsi que leur arrangement selon **Lieber, R. L., & Ward, S. R., 2011**. La relation suivante a donc été développée afin d'estimer cette surface. Relation définie par **R.D Sacks, R.R. Roy en 1982**

$$\text{PCSA (cm}^2\text{)} = \frac{\text{Muscle mass (g)} \times \text{Pennation angle (cos}\theta\text{)}}{\text{Muscle density (g cm}^{-3}\text{)} \times \text{fascicle length (cm)}}$$

Relation prenant en considération la masse musculaire, la densité musculaire définie dans la littérature étant égale à 1.0564 g cm^{-3} selon **Murphy et Beardsley en 1974** et simplifiée à 1.06 cm^{-3} .

L'organisation des fibres aura une grande incidence sur la vitesse, l'excursion et la force du muscle. En effet, les fibres longues vont permettre une plus grande vitesse de contraction ainsi qu'une meilleure excursion du fait de plus de sarcomères placés en séries. L'excursion et la vitesse de sarcomères en séries sont additives. Contrairement aux fibres courtes dans lesquelles les sarcomères en parallèles seront plus présents et permettront ainsi une plus grande surface avec un PCSA plus important. Ce qui conduit à une plus grande production de force (**Lieber, R. L., & Ward, S. R, 2011**).

Certaines grandeurs ont donc été approchées à partir du PCSA du muscle, telle que la force isométrique qui, selon une étude sur le cochon d'inde, montre un facteur de proportion entre le PCSA et la force isométrique de $22,5 \text{ N.cm}^{-2}$ (**Lieber, R. L., & Ward, S. R, 2011**). A ce jour, aucun autre facteur de proportionnalité n'a été évoqué.

Il a été montré et noté qu'un angle de pennation inférieur à 30° n'avait que très peu d'incidence sur la force totale produite car le cosinus d'un angle inférieur ou égale à 30° reste relativement proche de 1 ($\cos(30^\circ) = 0,87$). De ce fait, certains auteurs ne le prennent pas en considération lorsqu'il est inférieur à 30° (**Martin, M. L & al., 2020**).

L'étude qui suit a principalement été menée sur les muscles locomoteurs des mammifères. Leur fonction principale est donc le maintien postural, la marche et la course. Il est donc essentiel ici, de prendre en compte un paramètre qui différencie ces animaux dans leur locomotion. C'est leur fréquence de foulée. Il a été montré que la différence de fréquence de foulée lors de changement de locomotion (marche, trot, galop) chez les animaux est très étroitement liée à leur masse corporelle, M (**Heglund, N. C et al., 1974**). $F \propto M^{-0,14}$.

2.6 Allométrie

Il existe différents modèles allométriques proposés par **McMahon en 1984**, où il décrit et prédit les comportements mécaniques et physiques des animaux par des lois mécaniques simples. En effet, en considérant les membres et muscles des animaux comme de simples cylindres, McMahon établit des lois de puissance liant les dimensions, les masses, ainsi que certaines grandeurs comme la vitesse de déplacement ou encore la fréquence de foulée des différents animaux. Il les définit selon trois modèles allométriques. Le modèle allométrique par géométrie similaire. L'allométrie par similarité élastique puis l'allométrie par tension constante (**Naccarato-Grosspietsch, E. F. 1986**).

3 Problématique

Aux vues de la littérature, il est évident que la structure du muscle et le type de fibre musculaire jouent un rôle dans la fonction du muscle. Il semble donc pertinent de poser la problématique suivante :

Existe-t-il des relations entre les propriétés musculaires et la fonction du muscle chez les animaux ?

3.1 Hypothèses

- 1. Des différences de distributions de fibres dans les muscles locomoteurs devraient être observées entre les animaux des petites et grandes tailles**
- 2. Ces différences de compositions et structures musculaires peuvent être rationalisées par la fréquence de foulée des animaux.**
- 3. Les propriétés musculaires devraient être corrélées à la masse de l'animal.**

4. Matériels et méthodes

4.1 Littérature

Dans un premier temps, le travail le plus conséquent est la recherche bibliographique. Après avoir défini selon la littérature les propriétés les plus pertinentes du muscle, il a fallu recouper plusieurs dizaines d'articles différents afin d'essayer de compléter au mieux la base de données créée sur le logiciel Excel. Les moteurs de recherche tels que pub-Med, google scholar ont été les plus pertinents pour la recherche. Au total, cinquante animaux ont pu être recensés allant du plus petit mammifère terrestre, la musaraigne ($M < 2g$), au plus gros, l'éléphant ($M = 3800 kg$).

Cette base de données (visible à l'adresse indiquée en annexe I) regroupe plusieurs variables. Les noms communs et scientifiques des animaux avec leur classe animale, leur masse, les muscles étudiés avec leur masse (si précisé dans la littérature), la composition en type de

fibre, les dimensions moyennes des fibres, l'angle de pennation, le PCSA, ainsi que la force maximale développée par le muscle. Toutes ces grandeurs définies en partie II.B.

Lorsque certaines données n'étaient pas disponibles dans la littérature, nous avons essayé de les estimer lorsque nous avions les variables nécessaires, par exemple en calculant la force isométrique F via le PCSA. $F = \alpha \text{ PCSA}$ avec $\alpha = 22 \text{ N.cm}^{-2}$.

4.2 Traitement et analyse des résultats

Dans un second temps, les courbes de tendance ont été tracées à l'aide de Matlab afin d'essayer d'observer des corrélations avec masse de l'animal. Afin d'étudier la composition moyenne en fibre chez les différents animaux, la proportion des fibres I et des fibres II dans un muscle a été calculée (comprenant l'ensemble des fibres II.a, II.x et II.b). Les autres propriétés telles que le PCSA, la longueur des fibres, la force isométrique ont été regroupées dans la base de données. Les muscles les plus étudiés et retrouvés dans la littérature sont les muscles des quadriceps et leurs trois chefs, les muscles ischiojambiers, tibial antérieur, soléaire et gastrocnémiens et le muscle long extenseur des orteils (EDL). Ceux traités en analyse sont ceux où le plus grand nombre de données a été recensé. Les muscles : Soléaire ; Vaste latéral ; Semi-membraneux ; Long extenseur du gros orteil ; Gastrocnémien latéral ; Rectus femoris et le Tibial antérieur.

5. Résultats

5.1 *Distribution de fibres lentes et rapides (I, II)*

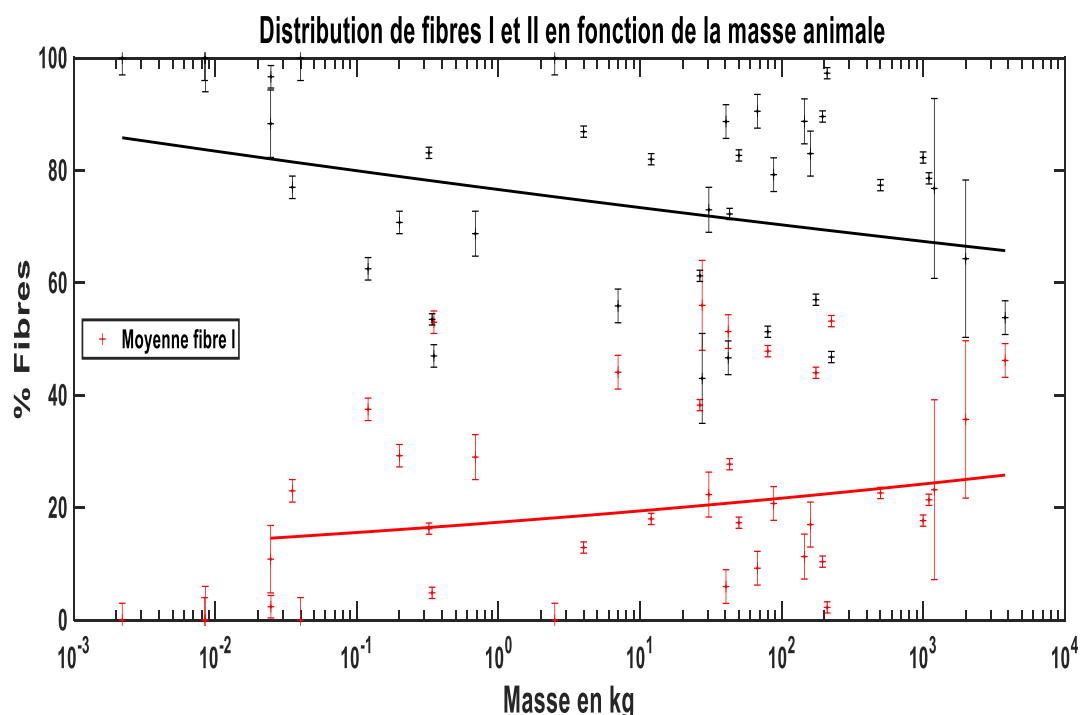
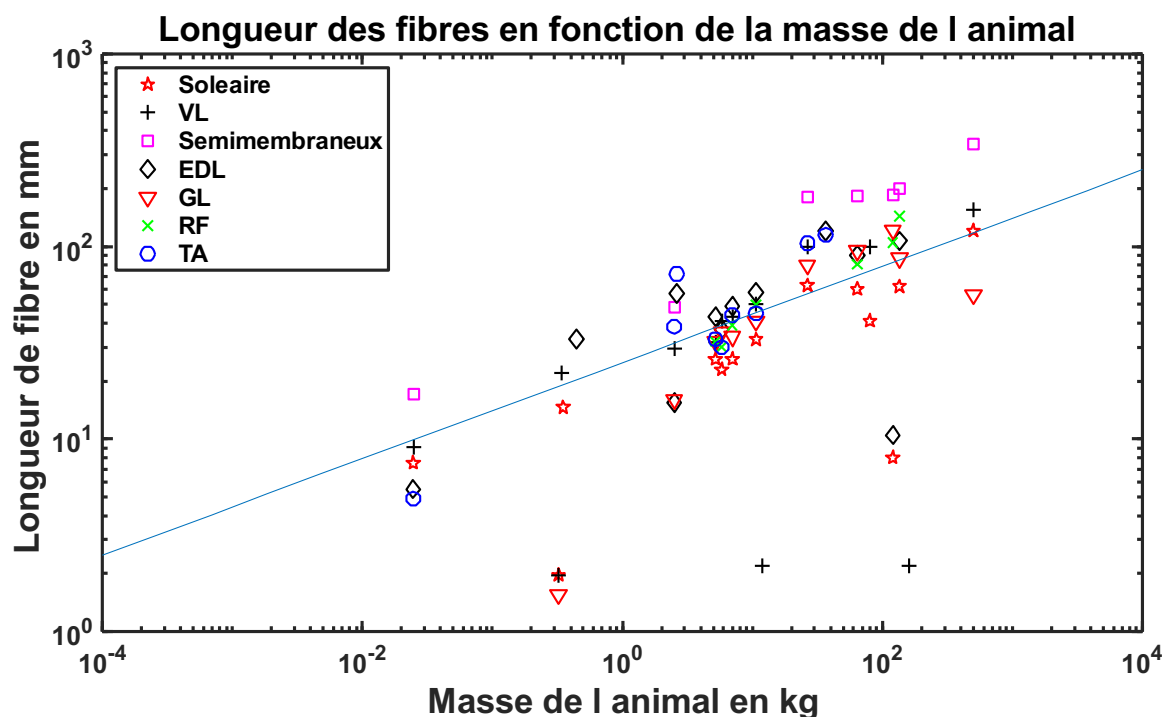


Figure 9 Graphique de distribution de fibre lentes et rapides

Le graphique ci-dessus en figure 11 représente la composition en fibres I et II moyenne des muscles locomoteurs recensés chez trente-neuf animaux. L'échelle est ici tracée en semilogx pour avoir une meilleure représentation des données. Ce graphique montre que le pourcentage de fibres lentes I en rouge augmente légèrement avec la masse de l'animal. Les muscles locomoteurs des animaux de très petites tailles sont principalement composés de fibres rapides de type II représentées en noir. Pour les animaux lourds, la fraction relative en fibre de type I augmente avec la masse.

5.2 Longueurs des fibres des muscles locomoteurs



La figure 10 ci-dessus représente l'évolution des longueurs de fibres des muscles locomoteurs chez les différents animaux en fonction de leur masse. Ces muscles sont le **soléaire**, **vaste latéral**, **semi-membraneux**, **long extenseur des orteils**, **gastrocnémiens latéral**, **rectus femoris** ainsi que le **tibial antérieur**. Il est observé ici une évolution de la taille de fibres avec la masse animal. Il est cependant noté qu'aucune loi allométrique ne peut en être déduite, en effet certaines fibres des muscles comme le **soléaire** ou **EDL** par exemple n'évoluent pas toujours avec la masse de l'animal. Cependant, la droite du modèle allométrique élastique de McMahon a été tracée afin d'observer si ce modèle est adapté sur certains muscles. Ici, **longueur de fibre $\propto M^{(1/4)}$** , **M** étant la masse de l'animal. Certains muscles d'animaux de petite taille semblent contenir des fibres très longues comparées à leur masse et aux autres animaux plus grands. Si l'on observe par exemple la longueur de fibre dans le muscle soléaire ou bien même le muscle vaste latéral de la souris (**0,024kg**) en figure 10 ci-dessous, on peut remarquer qu'elles sont de mêmes tailles voire plus grandes que chez certains animaux plus lourds.

5.3 Evolution de la masse musculaire

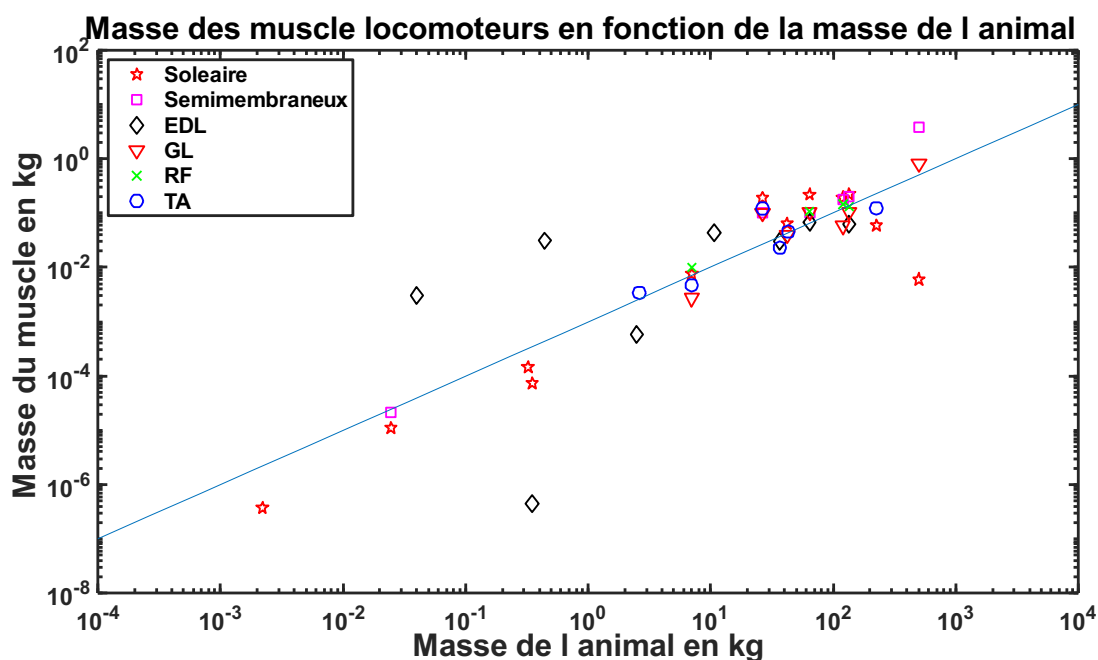


Figure 11 Evolution de la masse des muscles locomoteurs avec la masse de l'animal. Soléaire ; Semi-membraneux ; EDL : Long extenseur des orteils ; GL : Gastrocnémien latéral ; RF : Rectus femoris ; TA : Tibial antérieur

Même réflexion ici, il est observé que certains muscles comme le soléaire, ou encore le semi membraneux évoluent avec la masse de l'animal. Cependant certains ne suivent pas cette corrélation. Certaines masses musculaires sont totalement différentes d'une masse animale à l'autre, sans y trouver de corrélation. L'exemple le plus représentatif est le muscle **EDL** où aucune corrélation n'est observée. Il semble également que le muscle tibial antérieur et soléaire ne suivent plus de corrélation à partir d'une certaine masse de l'animal. Cependant, on note une certaine corrélation avec la masse de l'animal (droite bleue) avec un coefficient de **0,001** pour la majorité des muscles locomoteurs.

5.4 PCSA et force isométrique

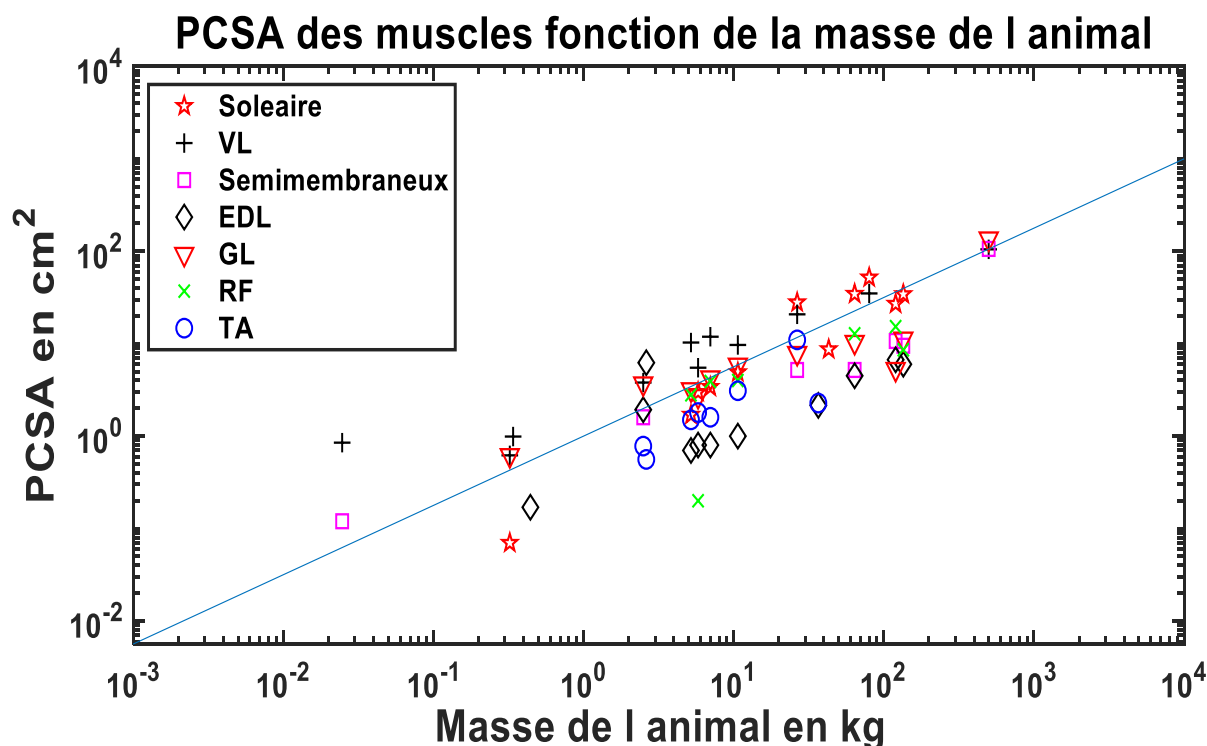


Figure 12 Evolution du PCSA des muscles avec la masse de l'animal. Soléaire ; VL : Vaste latéral ; Semi-membraneux ; EDL : Long extenseur des orteils ; GL : Gastrocnémien latéral ; RF : Rectus femoris ; TA : Tibial antérieur

La figure 12 représente l'évolution de la surface totale de fibre comprise dans le muscle, représentée par le PCSA défini dans la partie C.2 *Structure musculaire*, en fonction de la masse de l'animal. Il y a une certaine évolution logarithmique liée la masse. La droite bleue représente ici le modèle allométrique élastique de McMahon qui montre une évolution du $\text{PCSA} \propto M^{(3/4)}$. Quelques muscles peuvent ne pas répondre à cette évolution, mais elle est observée dans la majorité de ces derniers. La force isométrique en fonction de la masse de l'animal n'a pas été tracée ici du fait qu'elle ai été calculée à l'aide d'un coefficient de proportionnalité lié au PCSA tiré de l'article de **Lieber, R. L., & Ward, S. R, 2011**. Cependant, cette dernière a été tracé en fonction de la masse des muscles ainsi que la longueur moyenne des fibres en figure 13 et 14 ci-dessous.

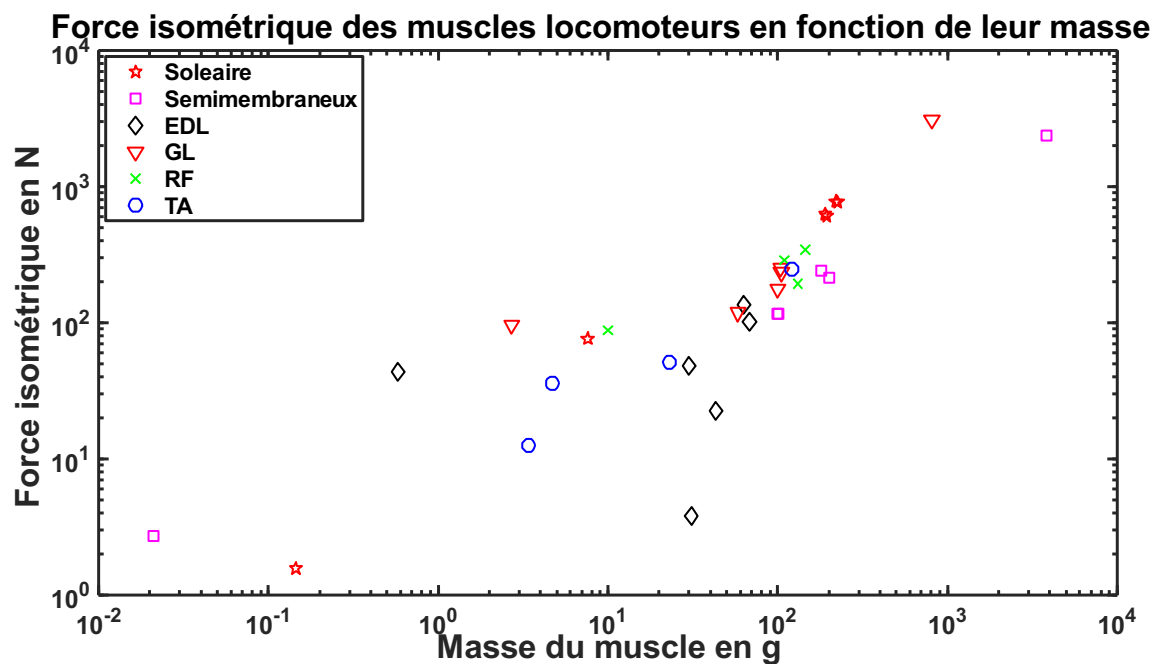


Figure 13 Evolution de la force isométrique en fonction de la masse du muscle :
Soléaire ; Semi-membraneux ; EDL : Long extenseur des orteils ; GL : Gastrocnémien
latéral ; RF : Rectus femoris ; TA : Tibial antérieur

La masse du muscle étant, pour la plupart, proportionnellement corrélée à la masse de l'animal (figure 11), il semblait pertinent d'observer l'évolution de cette force isométrique en fonction de cette masse musculaire. Il est observé que la force isométrique augmente avec la masse du muscle pour un grand nombre d'entre eux. Également, il est noté que les dimensions de certains muscles tels que le muscle EDL ne semblent pas être liées à la masse du muscle. Puisqu'il a été vu précédemment que la masse du muscle n'est pas liée par une loi de puissance à la masse de l'animal, cette loi de puissance ne peut donc s'appliquer dans ce cas présent.

5.5 Relation force/longueur de fibre

Force isométrique des muscles locomoteurs en fonction de leur longueur de fibre

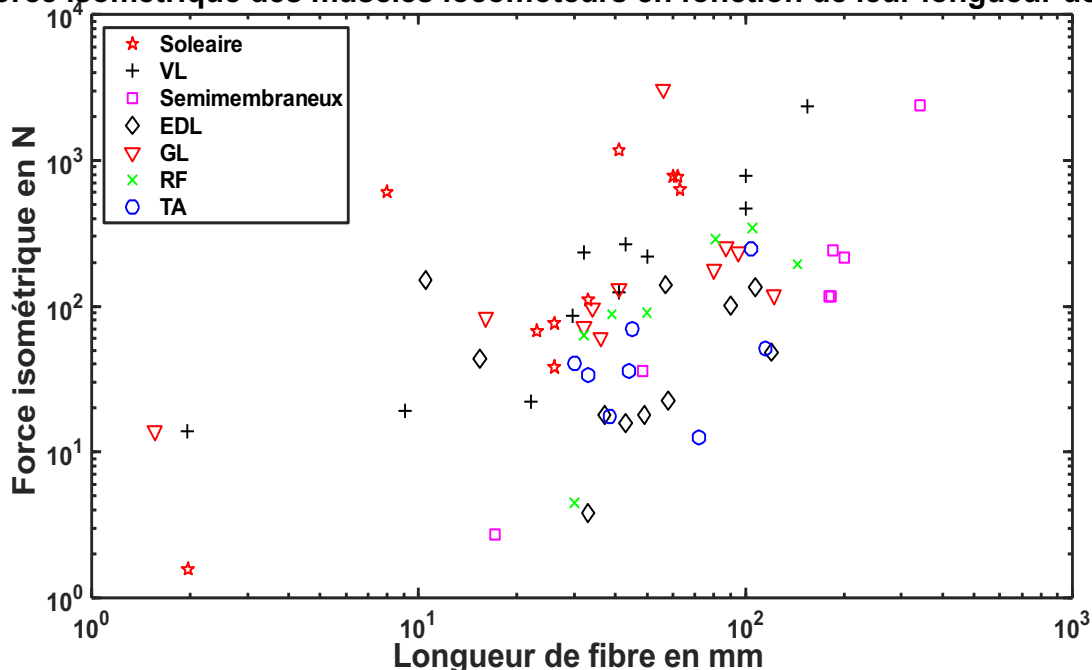


Figure 14 Evolution de la force isométrique en fonction de la longueur de fibre des muscles
Soléaire ; VL : Vaste latéral ; Semi-membraneux ; EDL : Long extenseur des orteils ; GL :
Gastrocnémien latéral ; RF : Rectus femoris ; TA : Tibial antérieur

Connaissant les propriétés physiques d'une structure avec des sarcomères en séries ou en parallèles, nous avons voulu tracer la relation force isométrique en fonction de la longueur de fibres au sein des animaux qui apparait en figure 14 ci-dessus. On note donc ici que la force isométrique ne semble pas être influencée de manière significative par la longueur des fibres des différents muscles. En effet, une trop grande disparité apparait pour pouvoir y trouver une corrélation. On retrouve parfois des fibres longues dans certains muscles qui développent moins de force que des fibres plus courtes et vice versa.

6 Discussion et limites

Les différents résultats obtenus pour les muscles locomoteurs chez différents animaux apportent plusieurs informations intéressantes. En effet, dans un premier temps, dans la composition de fibre rapides et lentes, il a été observé une certaine différence de distribution au sein des très petits et très grands animaux. Les muscles des très petits animaux tels que les souris et musaraignes sont principalement composés de fibres rapides de type II, alors que l'on observe une tendance de ces fibres II à diminuer avec la masse de l'animal comme l'avait montré **O'Neill, M. C et al en 2017**. Ce qui confirme notre première hypothèse concernant la différence de distribution de fibre avec la masse animale.

Ce premier résultat apporte un premier argument à la seconde hypothèse qui traite de la fréquence de foulée des animaux de petite taille. En effet, on sait que les fibres de type II sont des fibres à contraction rapide et donc à fréquence d'utilisation élevée. Selon **Heglund, N. C et al., 1974**, la fréquence de foulée est très étroitement liée à la masse de l'animal par la relation $f \propto M^{-0.14}$ avec M la masse de l'animale en kg et $\propto 269$. La fréquence de foulée des petits animaux tels que la souris serait donc de 450 min^{-1} comparée au cheval de 500kg qui serait aux alentours de 112 min^{-1} et à l'éléphant (3800kg) qui lui serait à 84 min^{-1} . Ceci est donc cohérent avec la distribution en fibre chez l'éléphant qui tend à avoir une proportion plus importante en fibres lentes que la souris.

D'autre part, ce qui pourrait confirmer cette hypothèse est la longueur des fibres observée chez ces animaux. Il a été noté en figure 10, que les fibres des muscles de petits animaux tendaient à être longues. Or, il a été montré dans la littérature que les fibres longues permettent plus de sarcomère en séries et donc de cumuler leur vitesse de raccourcissement et excursions. Et qu'à contrario, les muscles des gros animaux possèdent des fibres plutôt courtes comparée à leur masse ce qui, privilégie des sarcomères en parallèles et donc la force produite. Ces deux informations sur la composition et la longueur des fibres des petits animaux tend bien à confirmer qu'en fonction de leur fréquence de foulée, ces animaux ont besoin d'une structure capable de produire une fréquence de contraction élevée pour se déplacer.

Concernant les autres données, il est évident que l'on observe une certaine corrélation entre les propriétés musculaire et la masse de l'animal. Observation faite avec la loi allométrique de similarité élastique proposé par **McMahon**. En effet, certaines données sont validées par le modèle élastique de McMahon a la puissance $M^{(3/4)}$ pour le PCSA et $M^{(1/4)}$ pour la longueur de

fibre ce qui tend à valider la troisième hypothèse sur la relation entre certaines propriétés musculaire et la masse animal. Excepté pour un muscle en particulier qui est le muscle long extenseur des orteils **EDL**. Certains paramètres et certains muscles peuvent répondre à une loi allométrique. Cependant, d'autres données sont encore à recenser telles que les vitesses de contraction ainsi que l'excursion de chaque muscle. Ce qui, en effet, pourrait permettre de mieux comprendre les caractéristiques du muscle en fonction de ces deux dernières propriétés. Les propriétés telles que l'excursion du muscle ainsi que sa vitesse de contraction pourraient être étudiées en fonction de la longueur de fibre, la masse du muscle et surtout la composition en fibres rapides. Ces analyses pourraient expliquer plus finement et valider certaines hypothèses concernant l'arrangement des fibres au sein du muscle.

7 Conclusion

L'objet de cette étude était de pouvoir qualifier et quantifier la structure et composition musculaire au sein d'un large panel d'animaux afin d'observer si certaines tendances venaient à apparaître en fonction de la masse de l'animal. Nous avons apporté des réponses aux trois hypothèses qui annonçaient une différence de composition de fibres rapides et lentes en fonction de la masse de l'animal. Nous avons apporté une réponse à l'organisation musculaire, spécialement chez les petits animaux, qui serait plus spécifiquement liée à leur fréquence de foulée bien plus élevée que chez les gros animaux. Des informations sont encore à recenser afin de permettre une réponse plus complète à cette question. Enfin, nous avons commencé à démontrer que les propriétés microscopique et macroscopique étaient également liées à la masse de l'animal mais que par manque de temps et de données, des précisions sont encore manquantes sur le sujet.

8 Conclusion personnelle

Cette insertion professionnelle au sein du laboratoire de conception bio-inspirée m'a bien évidemment permis d'être plus efficace lors de mes recherches bibliographiques mais également de comprendre l'importance de la nature dans les possibilités d'évolutions de l'Homme. Ce stage a ouvert certaines possibilités d'avenir auxquelles je n'avais pas songé auparavant. En effet, je connaissais vaguement le biomimétisme mais ce stage m'a permis de comprendre tout l'intérêt de ce domaine et a réveillé ma curiosité à ce sujet. De plus ce stage

m'a permis d'acquérir de nouvelles compétences, notamment de communication en anglais lors des réunions hebdomadaires où l'équipe se réunit pour partager ses avancements et ses objectifs futurs, et également de nouvelles compétences sur le logiciel Matlab.

Annexe I

https://drive.google.com/file/d/1FgToQQLTBHwkQHWO-PQI2vVs2pj3y_qc/view?usp=sharing

Bibliographie

- Liu, K., & Jiang, L. (2011). Bio-inspired design of multiscale structures for function integration. *Nano Today*, 6(2), 155–175.
- Tupling, A. R. (2004). The sarcoplasmic reticulum in muscle fatigue and disease: Role of the sarco(endo)plasmic reticulum Ca^{2+} -ATPase. *Canadian Journal of Applied Physiology*, 29(3), 308–329.
- Cohen, C., Mouterde, T., Quéré, D., & Clanet, C. (2015). Capillary muscle. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112(20), 6301–6306.
- Martin, M. L., Travouillon, K. J., Fleming, P. A., & Warburton, N. M. (2020). Review of the methods used for calculating physiological cross-sectional area (PCSA) for ecological questions. *Journal of Morphology*, 281(7), 778–789.
- Bodine, S. C., Roy, R. R., Meadows, D. A., Zernicke, R. F., Sacks, R. D., Fournier, M., & Edgerton, V. R. (1982). Architectural, histochemical, and contractile characteristics of a unique biarticular muscle: The cat semitendinosus. *Journal of Neurophysiology*, 48(1), 192–201.
- Botinelli R, Schiaffino S, Reggiani C. 1991. Force velocity relations and myosin heavy chain isoform compositions of skinned fibres from rat skeletal muscle. *J Physiol* 437:655–672.
- Roy, R. R., Powell, P. L., Kanim, P., & Simpson, D. R. (1984). Architectural and histochemical analysis of the semitendinosus muscle in mice, rats, guinea pigs, and rabbits. *Journal of Morphology*, 181(2), 155–160.
- Reiser, P. J., Moss, R. L., Giulian, G. G., & Greaser, M. L. (1985). Shortening velocity in single fibers from adult rabbit soleus muscles is correlated with myosin heavy chain composition. *Journal of Biological Chemistry*, 260(16), 9077–9080.
- Scott, W., Stevens, J., & Binder-Macleod, S. A. (2001). Human skeletal muscle fiber type classifications. *Physical Therapy*, 81(11), 1810–1816.
- Tarasov, A. I., Griffiths, E. J., & Rutter, G. A. (2012). Regulation of ATP production by mitochondrial Ca^{2+} . *Cell Calcium*, 52(1), 28–35.
- Pette, D., & Staron, R. S. (2000). Myosin isoforms, muscle fiber types, and transitions. *Microscopy Research and Technique*, 50(6), 500–509.
- Bárány, M. (1967). ATPase activity of myosin correlated with speed of muscle shortening. *The Journal of General Physiology*, 50(6).
- Kohn, T. A., Curry, J. W., & Noakes, T. D. (2011). Black wildebeest skeletal muscle exhibits high oxidative capacity and a high proportion of type IIx fibres. *Journal of Experimental Biology*, 214(23), 4041–4047.
- Gans, C., and W.J. Bock (1965) The functional significance of muscle architecture: A theoretical analysis. *Ergeb. Anat. Entwicklungsgesch.*, 38: 115-142.

Rutherford, O. M., & Jones, D. A. (1992). Measurement of fibre pennation using ultrasound in the human quadriceps in vivo. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 65(5), 433–437.

Martin, M. L., Travouillon, K. J., Fleming, P. A., & Warburton, N. M. (2020). Review of the methods used for calculating physiological cross-sectional area (PCSA) for ecological questions. *Journal of Morphology*, 281(7), 778–789

Heglund, N. C., Taylor, C. R., & McMahon, T. A. (1974). Scaling Stride Frequency. *Science*, 186, 1112–1113.

Lieber, R. L., & Ward, S. R. (2011). Skeletal muscle design to meet functional demands. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 366(1570), 1466–1476.

R.D. Sacks, R.R.Roy (1982). Architecture of The Hind Limb Muscles of Cats: Functional Significance. *Journal of Morphology*, 185-195.

Heglund, N. C., Taylor, C. R., & McMahon, T. A. (1974). Scaling Stride Frequency. *Science*, 186, 1112–1113.

Naccarato-Grosspietsch, E. F. (1986). Muscles, reflexes, and locomotion. In *Mathematical Modelling* (Vol. 7, Issues 9–12). [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(86\)90099-0](https://doi.org/10.1016/0270-0255(86)90099-0)

Reiser, P. J et al., (1985). Shortening velocity in single fibers from adult rabbit soleus muscles is correlated with myosin heavy chain composition. *Journal of Biological Chemistry*, 260(16), 9077–9080.

Figure 1 : https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSnI_VskYaRKn17QZyvmtdZEQucm7oAR7paxw&usqp=CAU

Figure 2 : <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQxVVCxy1Do4pAlqd2Gv84SVWOOGXKZ5YBaww&usqp=CAU>

Articles et revues utilisés dans la base de données :

- Oishi, M., Ogihara, N., Endo, H., & Asari, M. (2008). Muscle architecture of the upper limb in the orangutan. *Primates*, 49(3), 204–209. <https://doi.org/10.1007/s10329-008-0082-5>
- Goto, M., Kawai, M., Nakata, M., Itamoto, K., Miyata, H., Ikebe, Y., Tajima, T., & Wada, N. (2013). Distribution of muscle fibers in skeletal muscles of the cheetah (*Acinonyx jubatus*). *Mammalian Biology*, 78(2), 127–133.
- Ogihara, N., Oishi, M., Kanai, R., Shimada, H., Kondo, T., Yoshino-Saito, K., Ushiba, J., & Okano, H. (2017). Muscle architectural properties in the common marmoset (*Callithrix jacchus*). *Primates*, 58(3), 461–472.
- Dick, T. J. M., & Clemente, C. J. (2016). How to build your dragon: Scaling of muscle architecture from the world's smallest to the world's largest monitor lizard. *Frontiers in Zoology*, 13(1), 1–17.
- Channon, A. J., Günther, M. M., Crompton, R. H., & Vereecke, E. E. (2009). Mechanical constraints on the functional morphology of the gibbon hind limb. *Journal of Anatomy*, 215(4), 383–400.
- Savolainen, J., & Vornanen, M. (1995). Fiber types and myosin heavy chain composition in muscles of common shrew (*Sorex araneus*). *Journal of Experimental Zoology*, 271(1), 27–35.
- Gleeson, T. T. (1983). A histochemical and enzymatic study of the muscle fiber types in the water monitor, *Varanus salvator*. *Journal of Experimental Zoology*, 227(2), 191–201.
- Goto, M., Kawai, M., Nakata, M., Itamoto, K., Miyata, H., Ikebe, Y., Tajima, T., & Wada, N. (2013). Distribution of muscle fibers in skeletal muscles of the cheetah (*Acinonyx jubatus*). *Mammalian Biology*, 78(2), 127–133.
- Ponganis, P. J., & Pierce, R. W. (1978). Muscle metabolic profiles and fiber-type composition in some marine mammals. *Comparative Biochemistry and Physiology -- Part B: Biochemistry And*, 59(2), 99–102.
- Kohn, T. A., Curry, J. W., & Noakes, T. D. (2011). Black wildebeest skeletal muscle exhibits high oxidative capacity and a high proportion of type IIx fibres. *Journal of Experimental Biology*, 214(23), 4041–4047.
- Myatt, J. P., Schilling, N., & Thorpe, S. K. S. (2011). Distribution patterns of fibre types in the triceps surae muscle group of chimpanzees and orangutans. *Journal of Anatomy*, 218(4), 402–412.
- Curry, J. W., Hohl, R., Noakes, T. D., & Kohn, T. A. (2012). High oxidative capacity and type IIx fibre content in springbok and fallow deer skeletal Muscle suggest fast sprinters with a resistance to fatigue. *Journal of Experimental Biology*, 215(22), 3997–4005.
- Graziotti, G. H., Ríos, C. M., & Rivero, J. L. L. (2001). Evidence for three fast myosin heavy chain isoforms in type II skeletal muscle fibers in the adult llama (*Lama glama*). *Journal of Histochemistry and Cytochemistry*, 49(8), 1033–1044.

- Toniolo, L., Maccatrozzo, L., Patruno, M., Pavan, E., Caliaro, F., Rossi, R., Rinaldi, C., Canepari, M., Reggiani, C., & Mascarello, F. (2007). Fiber types in canine muscles: Myosin isoform expression and functional characterization. *American Journal of Physiology - Cell Physiology*, 292(5), 1915–1926.
- Kohn, T. A., Hoffman, L. C., & Myburgh, K. H. (2007). Identification of myosin heavy chain isoforms in skeletal muscle of four Southern African wild ruminants. *Comparative Biochemistry and Physiology - A Molecular and Integrative Physiology*, 148(2), 399–407.
- Hyatt, J. P. K., Roy, R. R., Stuart, R., & Talmadge, R. J. (2010). Myosin heavy chain composition of tiger (*Panthera tigris*) and cheetah (*Acinonyx jubatus*) hindlimb muscles. *Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological Genetics and Physiology*, 313(1 A), 45–57.
- Kier, W. M., & Curtin, N. A. (2002). Fast muscle in squid (*Loligo pealei*): Contractile properties of a specialized muscle fibre type. *Journal of Experimental Biology*, 205(13), 1907–1916.
- Kohn, T. A., & Noakes, T. D. (2013). Lion (*panthera leo*) and caracal (*caracal caracal*) type iix single muscle fibre force and power exceed that of trained humans. *Journal of Experimental Biology*, 216(6), 960–969.
- Wickiewicz, T. L., Roy, R. R., Powell, P. L., Perrine, J. J., & Edgerton, V. R. (1984). Muscle architecture and force-velocity relationships in humans. *Journal of Applied Physiology Respiratory Environmental and Exercise Physiology*, 57(2), 435–443.
- English, A. W. M., & Weeks, O. I. (1987). An anatomical and functional analysis of cat biceps femoris and semitendinosus muscles. *Journal of Morphology*, 191(2), 161–175.
- Marchi, D., Leischner, C. L., Pastor, F., & Hartstone-Rose, A. (2018). Leg Muscle Architecture in Primates and Its Correlation with Locomotion Patterns. *Anatomical Record*, 301(3), 515–527.
- Eng, C. M., Smallwood, L. H., Rainiero, M. P., Lahey, M., Ward, S. R., & Lieber, R. L. (2008). Scaling of muscle architecture and fiber types in the rat hindlimb. *Journal of Experimental Biology*, 211(14), 2336–2345.
- Jürgens, K. D. (2002). Etruscan shrew muscle: The consequences of being small. *Journal of Experimental Biology*, 205(15), 2161–2166.
- Augusto, V., Padovani, C. R., & Campos, G. E. R. (2004). Skeletal Muscle Fiber Types in C57BL6J Mice. *Brazilian Journal of Morphological Science*, 21(2), 89–94.
- Kawai, M., Minami, Y., Sayama, Y., Kuwano, A., Hiraga, A., & Miyata, H. (2009). Muscle fiber population and biochemical properties of whole body muscles in thoroughbred horses. *Anatomical Record*, 292(10), 1663–1669.
- Roy, R. R., Powell, P. L., Kanim, P., & Simpson, D. R. (1984). Architectural and histochemical analysis of the semitendinosus muscle in mice, rats, guinea pigs, and rabbits. *Journal of Morphology*, 181(2), 155–160.

Thorpe, S. K. S., Crompton, R. H., Günther, M. M., Ker, R. F., & Alexander, R. M. N. (1999). Dimensions and moment arms of the hind- and forelimb muscles of common chimpanzees (*Pan troglodytes*). *American Journal of Physical Anthropology*, 110(2), 179–199.

Reiser, P. J., Moss, R. L., Giulian, G. G., & Greaser, M. L. (1985). Shortening velocity in single fibers from adult rabbit soleus muscles is correlated with myosin heavy chain composition. *Journal of Biological Chemistry*, 260(16), 9077–9080.

Lieber, R. L., & Blevins, F. T. (1989). Skeletal muscle architecture of the rabbit hindlimb: Functional implications of muscle design. *Journal of Morphology*, 199(1), 93–101.