

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

École Nationale Supérieure Vétérinaire



Domaine : Sciences de la nature et de la vie

Filière : Sciences vétérinaires

Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de Docteur

en

Médecine vétérinaire

THÈME

**Étude orthopédique du membre
thoracique du chat domestique en vue de
la conception d'une prothèse bionique.**

Présenté par : M. Rabah sidhoum Noure eddine

Soutenu publiquement, le 3 octobre 2021 devant le jury :

M Laamari A

MCB (ENSV)

Président

Mme Bouabdallah R

MCA (ENSV)

Promotrice

Melle Benmohand C

MAA (ENSV)

Examinatrice

2020-2021

Déclaration sur l'honneur

Je soussigné, Rabah sidhoum Noure eddine, déclare être pleinement conscient que le plagiat de document ou d'une partie d'un document publiés sous toute forme de support, y compris l'internet, constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée. En conséquence, je m'engage à citer toutes les sources que j'ai utilisées pour écrire ce mémoire de fin d'études.

Signature

Remerciements

Ce travail a été accompli grâce à l'aide de plusieurs personnes autant par leur contribution directe qu'indirecte tout le long de mon cursus, et auxquelles je voudrais témoigner ma gratitude.

Je souhaite avant tout remercier ma promotrice **Mme BOUABDALLAH R.**, pour le temps qu'elle a consacré à m'apporter les outils méthodologiques indispensables à la conduite de cette recherche. Son exigence m'a grandement stimulé, car sans votre patience et vos conseils pertinents jamais ce travail aurait pu voir la lumière.

Le mérite d'un mémoire est partagé entre l'auteur et son promoteur. Dans mon cas, ma promotrice m'a aussi apporté son soutien moral et intellectuel tout au long de ma démarche.

Un grand merci également à **M. LAAMARI A.**, président du jury.

Je remercie également **Melle BENMOHAND C.**, qui m'a fait l'honneur d'accepter d'examiner mon modeste travail.

L'enseignement de qualité dispensé à l'École Nationale Supérieure Vétérinaire d'Alger a également su nourrir mes réflexions et a représenté une profonde satisfaction intellectuelle. Merci aux enseignants-chercheurs de cette École pour ce qu'ils m'ont apporté.

Dédicaces

À mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,
Je dédie ce travail en particulier à ma raison d'être ma chère mère Bahia.

À mes chers frères et ami (e)s, Wassim, Amine, Sidali, Hakim, Mohamed et Cerine.
À toute ma grande famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.
À ma tante Hourya pour ses encouragements.
À la mémoire de ma grand-mère décédée avant de voir cet accomplissement.

À mes camarades de l'ENSV précisément ceux du groupe huit.

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infallible,
Merci d'être toujours là pour moi.

Résumé : Ce travail constitue une étude bibliographique du membre antérieur du chat visant la conception d'une prothèse bionique pour chat. Nous avons évoqué les différents modèles de prothèses actives, puis décrit l'ostéologie ainsi que la myologie du membre antérieur du chat. Une étude biomécanique théorique du membre antérieur selon un diagramme de corps libre a été abordée afin d'obtenir des formules mathématiques qui pourront servir dans d'éventuelles études pratiques. Deux techniques opératoires consistant de l'amputation du membre antérieur de l'animal ont été décrites, à savoir l'amputation du membre par désarticulation scapulohumérale et l'ablation de la scapula et du reste du membre. Les causes conduisant à ces mesures thérapeutiques ont été citées, en parallèle une réflexion a été portée sur la réalisabilité d'une exoprothèse du membre antérieur du chat ainsi qu'une ouverture sur des études complémentaires à réaliser pour prolonger le travail mené.

Abstract: This work is a bibliographical study on the forelimb of the cat aimed at the design of a bionic prosthesis for cats. Several points were evoked starting with an introduction describing the different models of active prostheses. Then we described the osteology as well as the myology of the forelimb of the cat followed by a theoretical biomechanical study of the forelimb according to a free body diagram in order to obtain mathematical formulas, which possible practical studies can rely on. Two operating techniques consisting in the amputation of the animal's forelimb were approached, namely the amputation of the limb by scapulohumeral disarticulation and the ablation of the scapula with the limb. The causes leading to these therapeutic measures were described, in parallel, a reflection was carried out on the feasibility of an exoprosthesis of the anterior limb of the cat as well as an opening on additional studies to be carried out to extend this work.

تمهيد: يشكل هذا العمل دراسة للطرف الأمامي للقط تهدف إلى تصميم طرف اصطناعي إلكتروني للقط. تم استحضار عدة نقاط بدءاً بمقدمة تصف النماذج المختلفة لأطراف الاصطناعية النشطة، ثم وصفنا التركيب التشريحي لعظام الطرف لمخطط الجسم الحر من أجل المامي للقط بالإضافة لعضلاته متبوعاً بدراسة نظرية ميكانيكية للطرف الأمامي وفقاً للحصول على الصيغ الرياضية التي يمكن استخدامها في الدراسات العملية الممكنة. تم وصف طريقتين جراحيّتين لبتر الطرف الأمامي للحيوان، وهما بتر الطرف عن طريق الفصل الكتفي العضدي واستئصال لوح الكتف مع الطرف، كما وصفنا الأسباب المؤدية إلى هذه الإجراءات العالجية بالتوازي، تم بالتوازي مناقشة جدوى الأطراف الاصطناعية الخارجية للطرف الأمامي للقط بالإضافة إلى تمهيد في الدراسات الإضافية التي يمكن إجراؤها لتوسيع العمل المنجز.

Liste des tableaux

Tableau 1. Table de comparaison entre quelques modèles de servomoteurs communs utilisés en prototypes biomédicaux et robotiques (Table personnel., 2021)	22
---	----

Liste des figures

Figure 1. Photographie d'un chat âgé de 6 ans portant des prothèses actives implantées. Source : BBC.com	4
Figure 2. Prothèse mécanique (source : ottobock-ortho.fr)	5
Figure 3. Os du membre thoracique (Hudson & Hamilton., 2010)	10
Figure 4. Muscles du membre antérieur (Hudson & Hamilton., 2010).	13
Figure 5. Extrémité de membre antérieur (Hudson & Hamilton., 2010).	14
Figure 6. Frame-by-frame séquence d'un chat qui marche, trotte puis court (de haut en bas). (Muybridge.,1887)	16
Figure 7. Représentation graphique des démarches symétriques et asymétriques. (Bhatti & Waqas., 2017).	17
Figure 8: Le signal EMG résultant de la sommation des potentiels d'action des différentes unités motrices. (Ceccato., 2009).....	18
Figure 9. Illustration des origines et insertions des muscles de l'épaule (Drew & Rossignol., 1987).	19
Figure 10. Représentation schématique des angles du membre antérieur (Simo saarakkala., 2019).	20
Figure 11. Diagramme de corps libre d'un seul segment du membre illustrant les forces, les moments ainsi que les accélérations linéaires et angulaires	21
Figure 12. Amputation du premier quartier avec la scapula (Langley-Hobbs & Montavon., 2009).	25
Figure 13. Étapes successives d'une amputation du membre thoracique d'un chien (incluant la scapula) (Smeak., 2012).....	26
Figure 14. Amputation du membre au niveau de l'humérus proximal (Langley-Hobbs & Montavon., 2009).....	28
Figure 15. Variabilité d'expression de la polydactylie féline, membres antérieurs (Danforth., 1947).	30
Figure 16. Photographie d'un chat présentant une polydactylie dite « en moufle » aux antérieurs (source : www.hemingwayhome.com).	31
Figure 17. Photographie des antérieurs d'un chat présentant une polydactylie dite « en raquette » Valloire-Lucot., 2012).....	31
Figure 18. Cas d'hémimélie radiale (Scott & McLaughlin., 2007)	32
Figure 19. Chaton de 4 semaines avec des membres et une queue raccourcis (Cornillie & van Lancker & Simoens., 2003).	32
Figure 20. Chaton de 4 semaines avec des membres et une queue raccourcis (Cornillie & van Lancker & Simoens., 2003).	32
Figure 21. Radiographies du jarret gauche d'un chat atteint de polyarthrite érosive à Mycoplasma gateae. (Lemetayer Taylor., 2014)	34
Figure 22. Radiographies du membre postérieur d'un chat atteint d'ostéomyélite	35
Figure 23. Photographie d'une gangrène des membres d'un chat	36

Liste des abréviations

COM : Center of mass (Centre de masse).

CSA : Chondrosarcome

EEG : Electroencéphalographie.

EMG : Electromyographie.

M. : Muscle.

Mm : Muscles.

NFS : Numérotation de formule sanguine.

P. : Processus.

P_{UM} : Potentiel d'action d'unité motrice

PVC : Chlorure de polyvinyle.

UM : Unité motrice.

Table des matières

I. Introduction.....	3
II. Généralités sur les prothèses	4
1. Les prothèses actives.....	5
1.1. La prothèse mécanique à forces internes	5
1.2. La prothèse hydraulique.....	5
1.3. Les prothèses EMG/EEG	6
2. Les prothèses passives	6
III. Anatomie du membre antérieur	7
1. Squelette appendiculaire	7
1.1. Squelette du membre thoracique.....	7
2. Myologie du membre antérieur du chat	9
2.1. Muscles du membre thoracique	11
2.1.1. Muscles extrinsèques	11
2.1.2. Muscles intrinsèques	11
IV. Biomécanique du membre thoracique.....	15
1. La locomotion chez le chat	15
1.1. La posture.....	15
1.2. La marche et son initiation.....	15
a. La marche.....	15
b. L'initiation de la marche.....	17
2. Étude dynamique du membre thoracique du chat	19
V. Amputation du membre thoracique.....	23
1. Temps opératoires de l'amputation du membre antérieur.....	23
1.1. Ablation du scapula avec le membre	23
2. Étiologie des amputations	29
2.1. Les néoplasmes musculosquelettiques malins communs chez le chat	29
a) L'ostéosarcome	29
b) Les fibrosarcomes et chondrosarcomes	29
2.2. Les malformations congénitales du membre antérieur	30
2.3. Les traumatismes	33
2.4. Les infections.....	33
a) L'arthrite septique.....	33
b) L'ostéomyélite	34
c) La gangrène.....	35

V. Discussion	37
VI. Conclusion	39
Références bibliographiques :.....	40

I. Introduction

Le chat est un mammifère adapté au déplacement quadrupède. Pour cela, ses membres présentent une conformation assez spécifique que ce soit sur le plan osseux, musculaire ou articulaire (Bhatti & Waqas., 2017).

Dans certains cas, l'animal subit une thérapie drastique consistant en l'amputation d'une partie ou de la totalité d'un membre. Cette dernière est considérée comme un dernier recours de traitement des blessures du membre (St jean., 1996).

Dans une enquête publiée en 2015 réalisé sur 234 chats au Royaume-Uni la cause principale des amputations était les fractures et leurs complications Environ deux tiers des cas concernent le membre postérieur de l'animal, 94% des propriétaires ont déclaré qu'ils seraient d'accord avec la décision d'amputer le membre affecté chez un animal de compagnie s'ils étaient à nouveau confrontés à la même décision (Foster & Wathes., 2015).

Bien que le chat se tienne bien sur trois membres après une amputation, il est envisageable d'essayer de substituer le ou les membres perdus artificiellement afin de redonner à cet animal de compagnie ses conditions initiales de déplacement naturel (Jarell & Farell., 2018).

De nos jours, il est prouvé scientifiquement que les animaux de compagnie utilisent réellement les prothèses après un entraînement approprié de plusieurs semaines. Le chat ne fait pas une exception même quand il s'agit de prothèses implantées (Jarell & Farell., 2014).

Lors de la réalisation d'une prothèse pour un animal, il est nécessaire de s'appuyer sur des études pluridisciplinaires et approfondies allant des connaissances médicales et biomécaniques jusqu'à l'ingénierie biomédicale (Jarell & Farell., 2018).

Ce travail a pour objectif de réaliser une revue bibliographique portant sur les principaux types de prothèses ainsi que des données anatomiques et biomécaniques du membre antérieur dans les conditions normales. Ainsi, cette étude orthopédique théorique pourra servir de base à un éventuel projet de réalisation d'une prothèse du membre thoracique chez le chat.

II. Généralités sur les prothèses

L'amputation d'un membre est généralement suivie de plusieurs conséquences sur l'animal à différents niveaux : biomécanique, physiologique et même éthologique tels : la perte de l'équilibre lors de la marche, les douleurs neuropathiques (Menchetti & Gandini., 2017) ainsi que d'autres problèmes d'adaptation et d'exposition du moignon (Dienta., 2007). De ce fait, l'application d'outils technologiques parallèlement aux techniques chirurgicales est devenue une nécessité en raison de la complexité de ces inconvénients.

Au départ (environ 484-425 av. J.-C) une prothèse avait un seul rôle bien défini qui était de traiter un problème mécanique et dynamique. Plus tard au 18^{ème} siècle, les innovations esthétiques, qui demeurent marginales face à l'intérêt ultime qui est de pallier l'absence du membre qui permet l'appui, le mouvement (Nicogossian., 2010).

Aujourd'hui, avec le développement de l'informatique, de l'électronique et de l'impression 3D, on utilise plus communément les termes d'organe bionique en médecine que de prothèse classique inanimée (Figure 1). Un membre bionique présente plusieurs avantages (Durfee & Iaizzo., 2019). Tout d'abord, la pose d'un membre bionique pour un animal est plus facile.

- l'aspect esthétique du membre bionique est indéniable
- un membre bionique améliore la vie de l'animal en facilitant sa réintégration dans son environnement
- le risque de rejet de la greffe est diminué.
- la prothèse bionique permet de restituer plus de 95% de l'activité du membre.
- avec la révolution qu'a apportée l'impression 3D et les logiciels de modélisation open source ou gratuits tels que : Blender, autocad, la réalisation d'une prothèse bionique pour animal est devenue plus facile et moins coûteuse.



Figure 1. Photographie d'un chat âgé de 6 ans portant des prothèses actives implantées. Source : BBC.com

Généralement les prothèses peuvent être classifiées selon leurs rôles, formes, ou fonctionnement en : prothèses actives et prothèses passives.

1. Les prothèses actives

Ce sont des prothèses mobiles contrôlées le plus souvent par le corps, elles sont classées comme suit (Stokosa., 2021) :

1.1. La prothèse mécanique à forces internes

C'est une prothèse composée de plusieurs pièces interchangeables. Elle participe dans le support ainsi que dans la locomotion. L'utilisateur commande sa prothèse grâce à un système de traction. Elle est généralement indiquée pour les milieux humides, poussiéreux ou impliquant de fortes vibrations.

La plupart du temps, les prothèses mécaniques à force interne sont composées de PVC.

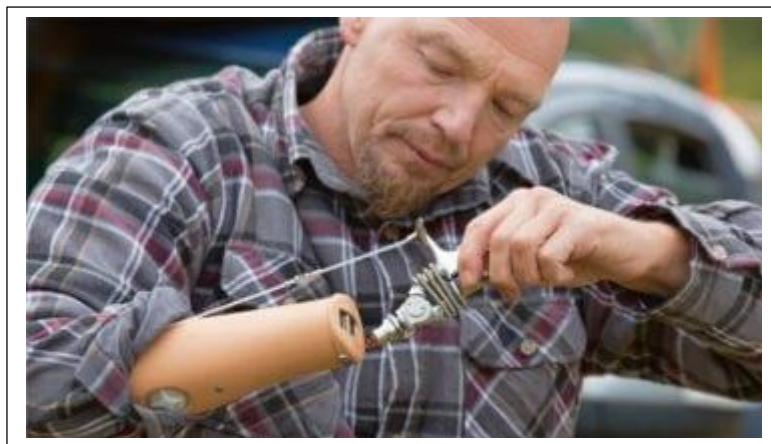


Figure 2. Prothèse mécanique (source : ottobock-ortho.fr)

1.2. La prothèse hydraulique

C'est une prothèse qui présente un plus grand degré de liberté et ainsi de mouvements que la précédente. Son principe de fonctionnement est basé sur la dynamique des fluides que l'on trouve dans ses différentes parties ; ainsi la pression exercée par la force du poids sur le liquide incompressible utilisé par exemple, alimentera un autre mouvement de la prothèse.

Les avantages de ce type résident dans le coût qui est moins élevé et le gain d'énergie étant donné que cette prothèse produit sa propre énergie cinétique (Stokosa., 2021).

1.3. Les prothèses EMG/EEG

Le fonctionnement de la prothèse EMG est basé sur les signaux myoélectriques émis lors de la contraction musculaire. Ces derniers sont traités généralement par un capteur d'électromyographie qui va amplifier, filtrer le signal puis le linéariser afin de le passer vers le microcontrôleur qui est une plateforme programmable recevant le signal traité. Selon un algorithme, le microcontrôleur va émettre un autre signal vers des servomoteurs (système asservi) pour contrôler leurs mouvements.

Ce type de prothèses existe sur le marché mais est d'un coût très élevé, ce qui fait qu'elles sont destinées beaucoup plus à l'usage humain et surtout pour la main.

Des modèles 3D imprimables existent en association avec la plateforme (Arduino, raspberry) et des capteurs EMG ainsi que des servomoteurs détachés.

Un autre type de prothèse fait l'objet de recherche, ce sont des organes bioniques contrôlés par les signaux électro-encéphalographiques dites prothèses contrôlées par la pensée.

Les signaux EEG nécessitent une plus grande sensibilité et spécificité des capteurs, les prothèses EEG représentent un domaine de recherche très avancée en ingénierie biomédicale et en neurologie on parle de neuroergonomie (Stokosa., 2021).

2. Les prothèses passives

Ce sont des prothèses inanimées qui facilitent l'équilibre, la stabilisation des objets (tels que le papier lors de l'écriture), ou les activités récréatives/professionnelles. Elles ont l'aspect d'un membre naturel, sont les plus légères et les moins onéreuses, mais elles ne permettent pas de préhension active ou de mouvements volontaires. Elles sont de deux types esthétiques et pro fonctionnelles (Stokosa., 2021).

III. Anatomie du membre antérieur

Le squelette des mammifères y compris celui du chat assure une fonction de support du corps dans une position semi-rigide ; ainsi que la protection des organes et tissus mous. La fonction de support des muscles permettant des mouvements normaux à des endroits bien spécifiques particulièrement au niveau des synovies (Hudson & Hamilton., 2010).

Le rôle primaire des muscles squelettiques dans la locomotion est la contraction causant une variation de l'angulation entre les os d'une part et de l'articulation d'autre part Plus couramment les articulations permettent le mouvement (Hudson & Hamilton, 2010).

Le squelette paraît comme une seule structure, mais en réalité il s'agit d'un conglomérat d'environ vingt-neuf os. Le squelette est divisé en deux grandes parties : le squelette axial et le squelette appendiculaire. Le squelette axial correspond à la partie médiane (axe longitudinal) de l'animal et comprend : les vertèbres, les côtes et le sternum (Hudson & Hamilton., 2010).

1. Squelette appendiculaire

Le squelette appendiculaire est composé des os des membres. En général les os longs des membres du chat sont plus droits que ceux du chien, par ailleurs les multiples processus et crêtes des os du squelette ne sont pas très prononcés étant donné la petite taille du chat domestique (Hudson & Hamilton., 2010), chez certains auteurs (Barone., 1986) on associe également aux deux types précédents le squelette singulaire (zonale), ce sont les ceintures : On distingue la ceinture pectorale en position antérieure et la ceinture pelvienne.

Dans cette partie, nous décrirons uniquement le squelette de la ceinture et du membre thoracique puisqu'il fait l'objet de notre étude.

1.1. Squelette du membre thoracique

La ceinture thoracique (Cingulum membri thoracici) est réduite, de chaque côté, à la scapula qui n'a pas d'articulation avec le squelette axial (Barone., 1986).

La scapula du chat (Figure 3) est plus courte et plus large que celle du chien. Elle est dépourvue de cartilage scapulaire et relevée à sa face latérale d'une épine scapulaire nettement inclinée sur la fosse infra-épineuse. **L'acromion** est très développé, avec un processus hamatus fort et long et un processus supra-hamatus bien délimité, long de 5 ou 6 mm. Les fosses supra-épineuse et infra-épineuse sont à peu près égales et la fosse sub-scapulaire très peu profonde. Les bords donnent à l'os un profil caractéristique : le caudal est rectiligne, tandis que le dorsal et le crânial s'unissent en un demi-cercle presque régulier, aboutissant centralement à une incisure scapulaire nette. Vu de face, le bord cervical est légèrement onduleux. La cavité glénoïdale est

prolongée contre le tubercule supra glénoïdal. Le processus coracoïde est fort, nettement saillant et recourbé du côté médial (Barone., 1986).

L'humérus du chat (Figure 3) n'est courbé que dans son quart proximal, rectiligne dans le reste de son étendue. La face caudale est relevée d'un relief longitudinal qui s'épaissit sous la tête. L'extrémité proximale est un peu aplatie d'un côté à l'autre. À l'extrémité distale, le capitulum n'est presque pas distinct. La fosse coracoïdienne ne communique pas avec la fosse olécrânienne. La fosse radiale est plus nette que chez le Chien. Les épicondyles, latéral et médial, sont très réduits. Enfin, il existe un foramen supra-condylaire tout en bas de la face médiale (Barone., 1986).

Le radius et l'ulna chez le chat restent des os séparés sur toute leur longueur. L'extrémité proximale du radius est positionnée crânialement et légèrement latérale par rapport à l'ulna, à l'extrémité distale le radius est en position médiane par rapport à l'ulna, la position de ces deux os dans l'avant-bras permette au chat d'exercer des mouvements de pronation et de supination avec le membre antérieur (Hudson & Hamilton, 2010). Vu de face l'avant-bras montre un large espace entre les surfaces adjacentes du radius et de l'ulna.

Le carpe quant à lui est composé de 7 os : intermédiaires, ulnaires et accessoires disposés en deux rangés (proximale et distale), un inconstant os sésamoïde dans le tendon du muscle long abducteur du pouce (pollicis longus) peut être observé sur la face médiale ; l'avant-bras contient 5 os métacarpiens et 5 doigts (Hudson & Hamilton, 2010).

L'os accessoire ou pisiforme est long, cylindroïde et rétréci à sa partie moyenne. Sa partie proximale s'articule à l'os ulnaire et à l'ulna par deux facettes concaves. L'extrémité libre fait épiphyse dans le jeune âge.

L'os ulnaire (ou os pyramidal), volumineux et aplati, est incurvé du côté palmaire en chevauchant l'os crochu de façon à venir prendre articulation avec l'os métacarpien V. Il présente d'autre part une large facette convexe pour répondre à l'ulna, son contact avec le radius est léger. L'os scapho-lunaire (ou intermedioradial) est plus volumineux que les autres os du carpe ; il est articulé d'une part à la presque totalité de la surface distale du radius et d'autre part aux quatre os de la rangée distale du carpe. Sa surface articulaire proximale forme un volumineux condyle à grand axe transversal et s'excave du côté abaxial répondant au processus styloïde du radius. La surface distale présente trois petites cavités ; la cavité abaxiale est la plus large et possède une petite facette répondant à l'os trapèze. L'extrémité abaxiale forme un volumineux tubercule saillant du côté palmaire. L'os hamatum (ou crochu) est de beaucoup l'os le plus gros de la rangée distale. Il est articulé aux os métacarpiens IV et V et sa face

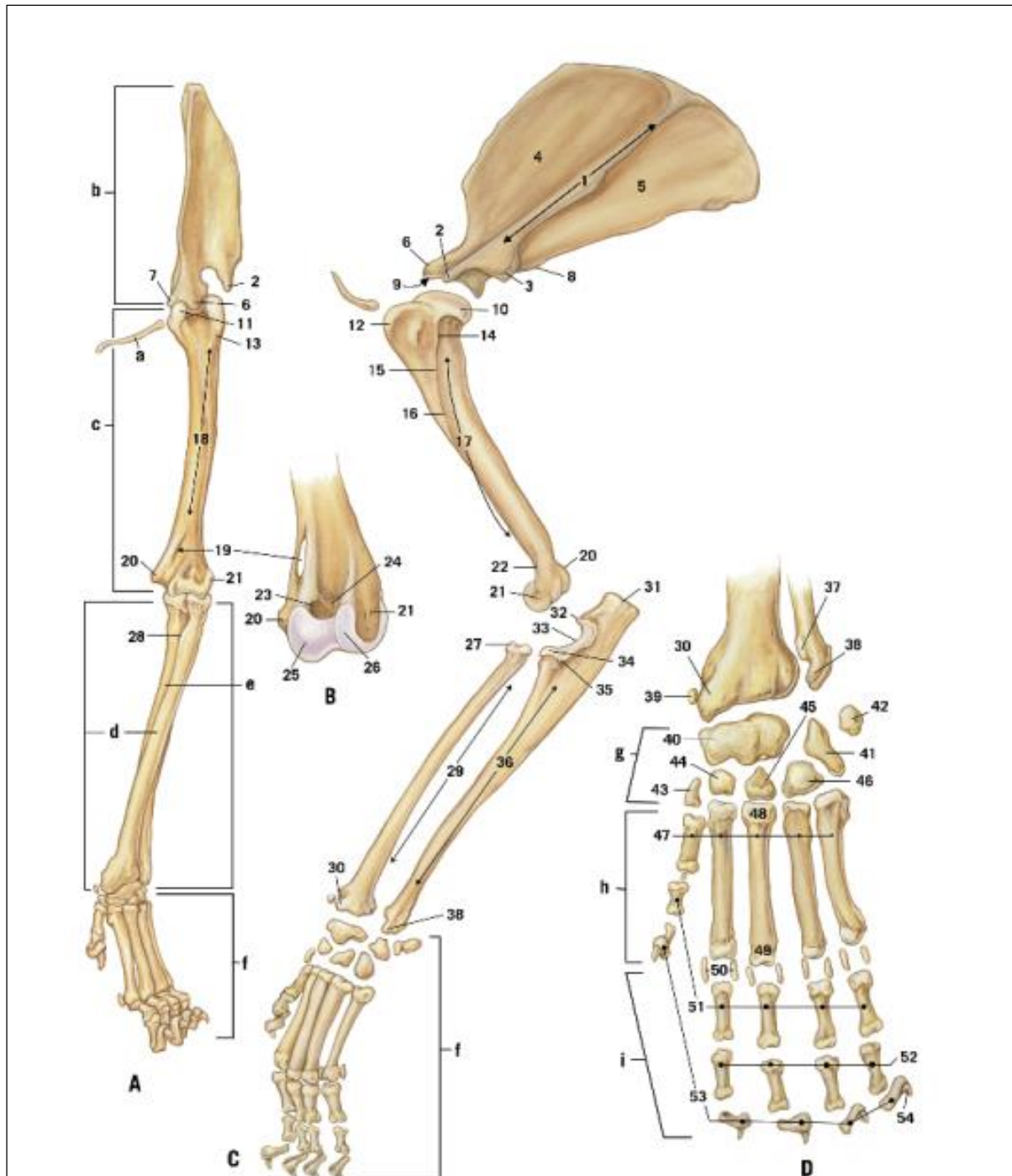
proximale répond à l'os ulnaire. L'os capitatum, comprimé est plus petit que le précédent et plus grand que l'os trapézoïde. Il surmonte l'os métacarpien III et lui répond par une surface allongée. Sa face proximale est très convexe pour répondre à la cavité moyenne de l'os intermedioradial. L'os trapézoïde, aplati de dessus en dessous, est étroit, triangulaire à pointe dorsale. Sa face distale, répond exactement à l'os métacarpien II. Ce dernier, le plus petit de tous les os du carpe, est enclavé entre le précédent et les deux premiers os métacarpiens (Barone, 1986).

Le doigt I possède deux phalanges alors que le restes des doigts en possèdent trois chacun (Figure 4). Les doigts II-V ont une paire de petits os sésamoïdes proximaux situés sur la surface palmaire de l'articulation métacarpo-phalangienne. Chez le chat, les extrémités distales des phalanges moyennes sont obliques et biseautées. Les phalanges distales des doigts II-V sont légèrement modifiées, de sorte que le chat, au repos, place ses mains sur le sol. Cet os se trouve dans une position latérale de la phalange moyenne, par conséquent, la position de repos de l'articulation interphalangienne distale est fortement hyper-extensible. Cette orientation des phalanges moyennes et distales est maintenue passivement par une paire de ligaments élastiques dorsaux et permet à l'animal de rengainer la griffe pendant le mouvement ou le repos s'il le souhaite (Hudson & Hamilton., 2010).

2. Myologie du membre antérieur du chat

Le nombre des muscles est plus variable encore que celui des os, il est surtout en plus difficile à estimer. Pour une même espèce, ce qui tient aux conventions adoptées pour le dénombrement. Le nombre diffère selon si l'on compte le nombre de faisceaux métamérisés ou si on les considère comme de simples subdivisions d'un même muscle. Par ailleurs, des muscles séparés dans certaines espèces peuvent être plus ou moins considérés soit comme des entités distinctes, soit comme une formation unique (Barone., 1986).

De la même manière que le squelette les muscles peuvent être répertoriés en **musculature axiale**, englobant ; les muscles de la tête, les muscles epaxiaux et hypaxiaux, les muscles du mur thoracique, les muscles abdominaux ainsi que ceux de la queue, et en **musculature appendiculaire** représentée par les muscles du membre thoracique et pelvien (Hudson & Hamilton., 2010).



a-clavicule. b-scapula : 1.épine scapulaire 2-3.Acromion 2.processus hamatus 3.processus supra-hamatus 4.fosse supra-épineuse. 5.fosse infra-épineuse. 6.tubercule supra glénoïde. 7.processus coracoïde. 8. tubercule infra glénoïde 9. cavité glénoïde. **c-Humérus :** 10.tête 11. petit tubercule 12.grand tubercule 13.crete du grand tubercule 14.tubérosité du teres mineur 15.ligne tricipitale 16.tubérosité deltoïde 17.rainure brachiale 18.corps 19.foramen supracondylaïre 20.epicondyle médiane 21.epicondyle latéral 22.crête supracondylaïre latérale 23.fosse coronoïde 24. Fosse radiale 25. Trochlée 26. capitulum **d-Radius :** 27. Tête 28.tubérosité radiale 29.corps 30.processus styloïde 31.tubérosité olécraniennne 32.processus anconé 33.entaille trochléaire. 34.processus coronoïde médiale. 35. processus coronoïde latéral 36. corps ulnaire. 37. circonférence articulaire. 38. processus styloïde latéral. **f-Manus g- Os du carpe :** 39.os sésamoïde 40.os carpien intermedioradial. 41.os ulnaire du carpe 42. os accessoire du carpe 43.os carpien I 44.os carpien II 45.os carpien III 46.os carpien IV **h Os métacarpiens :** 47.os métacarpien I à V 48.base de l'os métacarpien III 49.tête de l'os métacarpien III 50.les os sésamoïdes proximaux du doigt II 51.phalanges proximales I à V 52.phalanges moyennes II à V 53.phalanges distales I à V.

Figure 3. Os du membre thoracique A-vue crâniale Figure B-vue crâniolaterale de l'humérus distal C-vue latérale D-vue dorsale de l'extrémité distale de l'avant-bras et de la patte (Hudson & Hamilton., 2010)

2.1. Muscles du membre thoracique

Étant donné que ce membre n'a pas de connections osseuses avec le squelette axial, les muscles qui le composent sont relativement d'une large importance (Hudson & Hamilton., 2010).

Les muscles du membre thoracique sont soit **extrinsèques** ou **intrinsèques**.

2.1.1. Muscles extrinsèques

Ces muscles sont : le muscle pectoral superficiel, pectoral profond, brachio-céphalique, omo-transversaire, trapèze, rhomboïde, grand dorsal et le muscle serratus ventrales.

Le muscle pectoral superficiel ne peut pas toujours être séparé en des parties transverses et descendantes, de plus ce dernier s'allonge jusqu'à s'insérer sur l'ulna, les muscles pectoraux superficiels passent tous sous le m. pectoral superficiel jusqu'à ce qu'ils gagnent leurs points d'insertion au niveau de l'humérus.

Le muscle brachio-céphalique est divisé en deux muscles (cleidobrachial et cléido-céphalique), chez le chat un os constant de la clavicule est localisé au niveau de ces trois muscles et sert d'origine. Le muscle cleidobrachial et contrairement à ce que son nom fait entendre il s'insère au niveau de l'ulna (Hudson & Hamilton., 2010).

2.1.2. Muscles intrinsèques

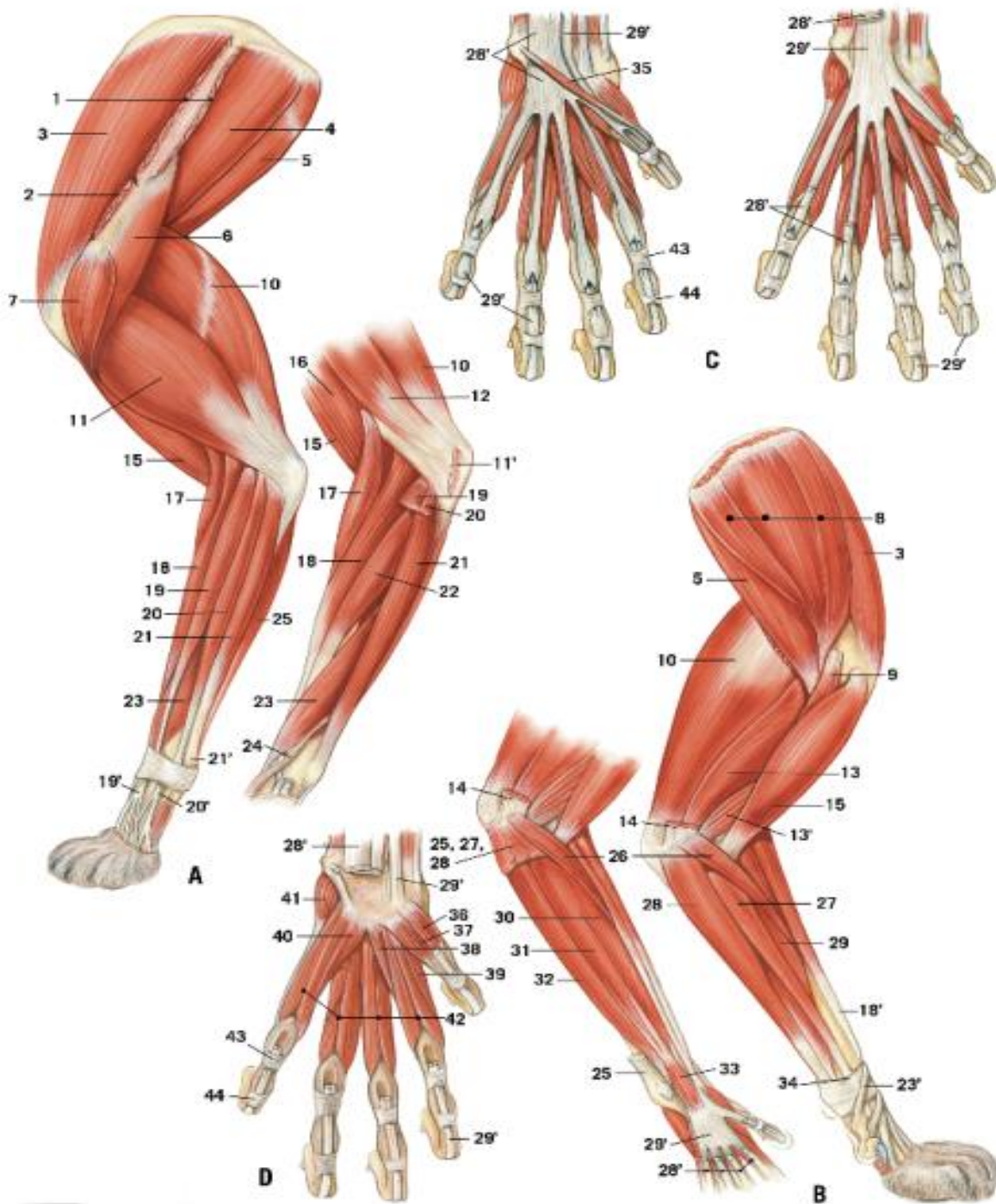
Les muscles intrinsèques du membre antérieur s'insèrent tous sur le squelette appendiculaire, selon leur innervation, localisation et fonctions ils peuvent être classés en :

- muscles extenseurs de l'épaule qui sont les muscles supra-épineux, infra-épineux, et le muscle sub-scapulaire. Ces muscles participent aussi à la stabilisation de l'articulation de l'épaule en supportant les ligaments gléno-huméraux (Hudson & Hamilton., 2010).
- muscles fléchisseurs de l'épaule : muscle deltoïde, muscle grand rond et muscle petit rond.
- muscles extenseurs du coude : muscle triceps brachial, m. anconé et le muscle tenseur du fascia antébrachial, le triceps brachial du chat comprend 4 chefs.
- les muscles fléchisseurs du coude : le muscle coracobrachial, biceps brachial et le muscle brachial. Les muscles biceps brachial et brachial s'insèrent chacun sur un seul os ; le radius et l'ulna respectivement. Le muscle coracobrachialis est inclus dans ce groupe en raison de sa localisation et de son innervation, même s'il n'agit pas réellement sur le coude.
- muscles extenseurs des articulations carpienne et digitale : le muscle brachioradial, extenseur radial du carpe, extenseur digitale commun, extenseur digital latéral, long abducteur du pouce, extenseur du doigt I et II et le muscle supinateur. Crânialement on trouve le muscle antébrachial crânien, le muscle brachioradial situé superficiellement est bien développé et contribue à la

capacité de supination du chat. Le muscle extenseur radial du carpe présente une partie longue et une partie courte. Les muscles extenseurs digitaux communs et latéraux s'insèrent sur les doigts II-V.

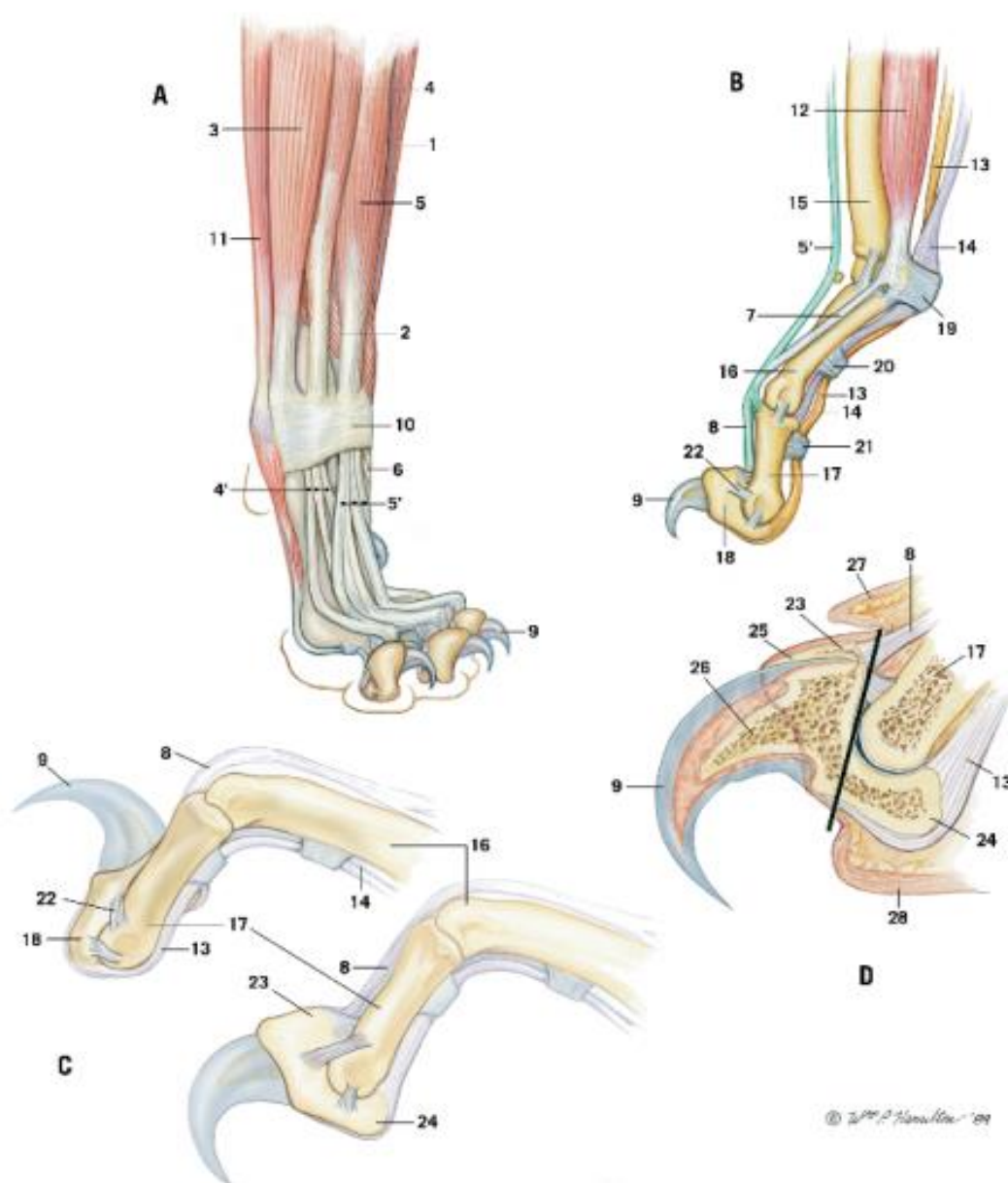
Ces muscles anté-brachiaux se lient en traversant le carpe par l'extenseur retinaculum, qui est un épaississement visible du fascia dans cette zone. Le tendon de l'extenseur digital commun qui est rejoint par d'autres tendons, s'insère sur le processus extenseur des phalanges distales (Barone., 1986)

-les muscles fléchisseurs des articulations carpiennes et digitales : le muscle fléchisseur radial du carpe, fléchisseur superficiel du doigt, fléchisseur ulnaire du carpe, extenseur ulnaire du carpe, fléchisseur digital profond, rond pronateur, et le muscle carré pronateur. Sur l'extrémité caudale de l'avant-bras, le muscle fléchisseur digital profond possède les 3 chefs observés chez d'autres carnivores, la taille relative de ces chefs est à peu près égale chez le chat. Le muscle extenseur ulnaire du carpe, agit comme un fléchisseur du carpe malgré son nom, mais conserve son innervation phylogénétique par le nerf radial. Le muscle fléchisseur digital profond s'insère sur la surface palmaire des phalanges distales et va également agir pour dégainer la griffe chez le chat. Les muscles ronds pronateurs et carré pronateur sont inclus dans ce groupe en raison de leur emplacement et de leur innervation seulement (Figure 5).



M. trapèze, coupe. 2 M. Omo-transverse. 3 M. supra-épineux. 4 M. infra-épineux. 5 M. grand rond. 6-7 M. deltoïde 6 os scapulaire 7 os acromial 8 M. sub-scapulaire. 9 M. coracobrachial 10-13 M. triceps brachial 10 Chef long 11 Chef latéral 11' son tendon 12 Chef accessoire 13 Chef moyen. 13' ses parties courtes 14 M. tenseur du fascia antébrachial, coupe 15 M. biceps brachial. 16 M. brachial 17 M. brachioradial 18 M. extenseur radial du carpe 18' son tendon 19 M. extenseur digital commun 19' ses tendons 20 M. extenseur digital latéral. 20' son tendon 21 M. extenseur ulnaire du carpe 21' son tendon 22 M. supinateur 23 M. abducteur long du pouce 23' son tendon 24 M. extenseur du pouce et doigt II 25 M. fléchisseur ulnaire du carpe. 26 M. pronateur rond 27 M. fléchisseur radial du carpe 28 M. fléchisseur digital superficiel 28' son tendon 29 M. fléchisseur digital profond 29' son tendon 30-32 tête du muscle fléchisseur profond du doigt 30 tête radiale 31 tête humérale 32 tête ulnaire. 34 Extenseur retinaculum 35 M. abducteur court du pouce 36 M. fléchisseur court du pouce 37 M. adducteur du pouce. 38 M. adducteur digital II 39 M. abducteur digital II 40 M. adducteur digital V 41 M. abducteur digital V 42 Mm. Interosseux.

Figure 4. Muscles du membre antérieur (A. Vue latérale, musculature intrinsèque et profonde B. Vue médiale, musculature intrinsèque et profonde C. Vue palmaire, musculature superficielle et peu profonde de la patte D. Vue palmaire, musculature profonde de la patte (Hudson & Hamilton., 2010).



1 M. extenseur radial du carpe 2 M. abducteur long du pouce 3 M. extenseur ulnaire du carpe 4 M. extenseur latéral du doigt 4' son tendon 5 M. extenseur digital commun. 5' son tendon 6 Tendon du muscle extenseur des doigts I et II. 7 bande extenseuse des muscles interosseux. 8 tendons extenseurs combinés 9. griffe recouvrant le processus unguéal. 10 retinaculum extenseur 11 M. fléchisseur ulnaire du carpe 12 M. interosseux. 13 tendon du m. fléchisseur profond du doigt 14 Tendon du m. fléchisseur superficiel du doigt. 15 os du métacarpe 16 phalange proximale 17 phalange moyenne 18 phalange distale 19 lig. annulaire plantaire 20 lig. annulaire digital proximal 21 lig. annulaire digital distal 22 lig. élastique dorsal 23 processus extenseur 24 tubercule fléchisseur 25 crête unguéale 26 processus unguéal 27 peau de la gaine de la griffe

Figure 5. Extrémité du membre antérieur. A, vue dorsale de la musculature superficielle et tendons de l'extrémité distale de l'avant-bras et de la patte. B, vue latérale de la musculature superficielle et tendons de l'extrémité distale de l'avant-bras et de la patte. C, vue médiale d'un doigt avec ses tendons et ligaments D, vue médiale de la griffe rétractée et étendue (Hudson & Hamilton., 2010).

IV. Biomécanique du membre thoracique

1. La locomotion chez le chat

La locomotion est la faculté, permettant à l'être vivant de se mouvoir. Le mode de locomotion idéal pour le chat est la marche à quatre pattes (quadrupédie), le rendement énergétique est ainsi plus avantageux pour un quadrupède (Bhatti & Waqas., 2017).

Beaucoup d'études biomécaniques sur les membres de l'être humain ainsi que celle menées sur ceux des animaux plus précisément les félins considèrent la marche comme condition de référence (Hayot & Lacouture., 2010).

1.1. La posture

La posture est le maintien actif de la configuration des segments du corps dans l'espace. Bien qu'elle représente l'aspect statique, elle n'en demeure pas moins importante lors de la locomotion (activité dynamique). En effet l'exécution du mouvement a besoin d'une tension musculaire ainsi que d'une activité posturale adaptée, afin de maintenir le corps érigé. De ce fait on définit deux types de posture (Ceccato., 2009) :

- La posture statique : elle correspond au positionnement des segments corporels sous la contrainte des forces de gravité seulement (immobile).

- La posture dynamique : dans cette forme, la posture est conçue comme une activité musculaire directement associée au mouvement, i.e. permettant au mouvement de se réaliser tout en maintenant l'édifice apte à réagir à d'autres stimulations extérieures.

D'après les définitions ci-dessus l'établissement d'un équilibre entre ces deux principes contradictoires est nécessaire : se déplacer pour accomplir une tâche et réagir à la perturbation de l'équilibre postural induite par ce mouvement (Horak & McPhersen., 1996).

1.2. La marche et son initiation

a. La marche : La marche est un processus locomoteur cyclique au cours duquel il y a une alternance entre les phases des membres. Un membre peut se trouver soit en phase de balancement ou en phase de support, la meilleure description de la marche d'un être vivant est l'analyse du cycle de la marche (Figure 6).

Quatre phases sont généralement observées lors du mouvement d'un quadrupède. La première phase correspond à la phase où tous les 4 membres sont en appui (phase de support) ; la deuxième phase correspond au moment où un membre est en balancement et les trois restants en appui ; la troisième phase-début lorsque deux membres sont en balancement et les deux autres maintiennent le support (Bhatti & Waqas., 2017).

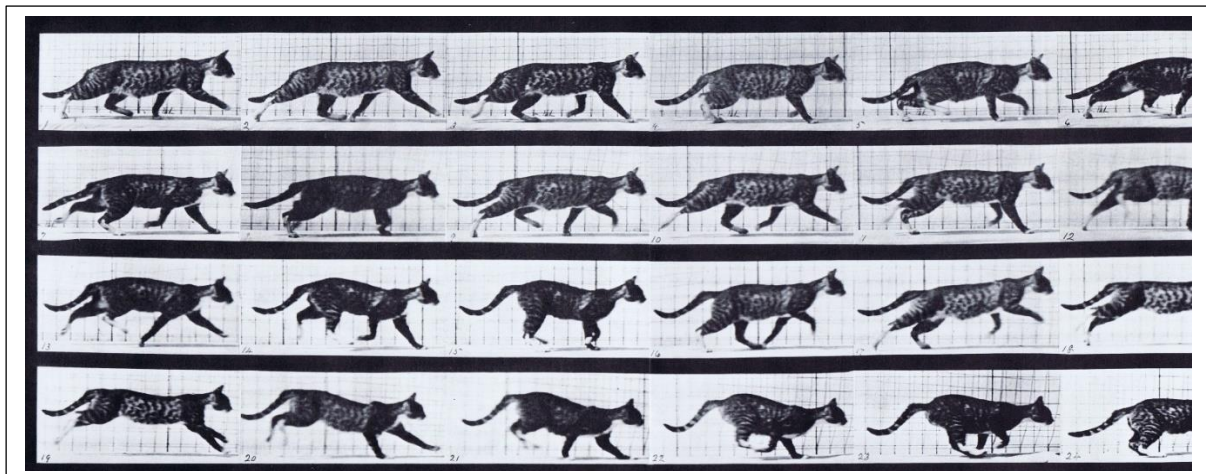


Figure 6. Frame-by-frame séquence d'un chat qui marche, trotte puis court (de haut en bas) (Muybridge., 1887).

Le mouvement des membres à lui seul ne garantit pas une bonne marche car il faut maintenir un certain équilibre afin d'éviter de tomber. Lors de la locomotion, on observe aussi un relèvement de la tête, de l'encolure ainsi que du dos puis leur retour à un état initial. Cette variation permet de maintenir l'équilibre du système en mouvement (Bhatti & Waqas., 2017). La quadrupédie a été décrite d'une façon qualitative, cependant cela reste insuffisant car la marche ou la course aussi simples qu'elles puissent paraître sont des phénomènes compliqués qui doivent être quantifiés.

Certains paramètres peuvent être extraits pour quantifier la marche :

- La durée du cycle : appelée aussi période, est le temps exprimé en secondes s'écoulant durant un cycle de marche ; une normalisation du cycle est possible et permet d'exprimer la survenue des phénomènes relatifs au mouvement en pourcentage durant ce dernier (Ceccato., 2009) :
- la fréquence : est l'inverse de la période elle exprimée en *pas/min*.
- La vitesse de marche : est la vitesse moyenne (m/s ou km/h)
- La foulée : est la distance (en mètres) parcourue entre deux cycles de marche successifs.

En associant l'analyse quantitative et qualitative du cycle de marche des quadrupèdes tels que le chat deux grandes catégories de démarches (Figure 7) peuvent être discriminées ; la démarche symétrique et la démarche asymétrique. Elle est symétrique lorsque les deux membres gauches et droits s'alternent lors du mouvement et elle est asymétrique lorsque les deux membres se déplacent ensemble dans la même phase de balancement.

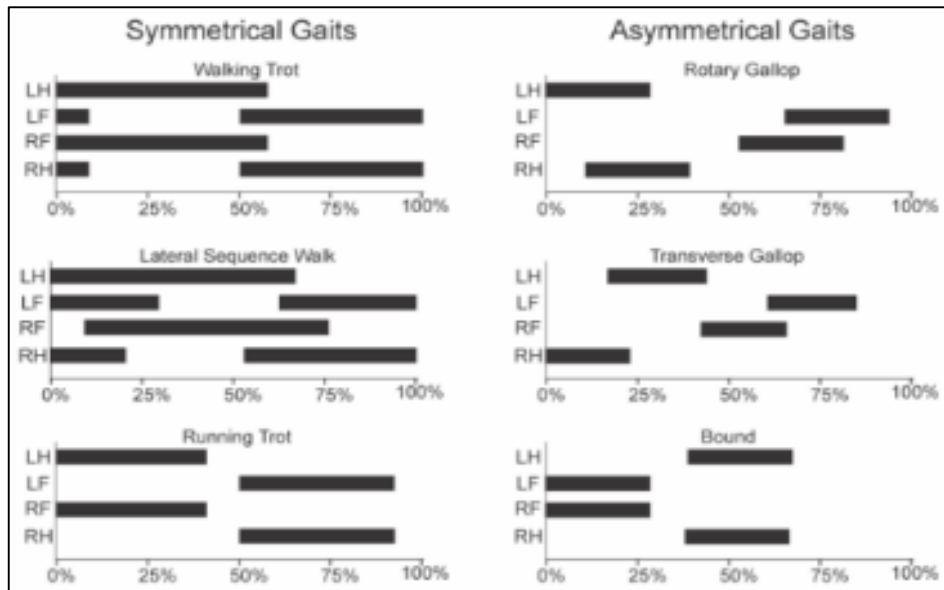


Figure 7. Représentation graphique des démarches symétriques et asymétriques. (Bhatti & Waqas., 2017).

Parmi les facteurs à prendre également en considération lors d'une étude cinétique quantitative de la marche est le cycle de marche définie entre deux appuis du talon du même pied chez l'homme et deux appuis de la même patte chez le chat, le rapport cyclique (entre la durée d'appui sur un membre et celle du cycle) est un outil important qui permet de connaître les membres les plus utilisés par l'animal selon les scénarios possibles (Jarrel & Farrel., 2018).

b. L'initiation de la marche

L'initiation de la marche comme tout mouvement volontaire est contrôlée par un influx nerveux central. Elle nécessite un potentiel d'action. Ce dernier ne peut être déclenché sans que le stimulus dépasse un certain seuil (55mv), ce qui conditionne non seulement la contraction d'une unité motrice (UM) mais aussi la fréquence et les potentiels d'action engendrés par des phénomènes électrochimiques (Ceccato., 2009).

Tout d'abord, le système nerveux central émet des signaux vers le système nerveux périphérique sous la forme de variations de potentiels électrochimiques. Ces derniers permettent par la suite une variation de polarité à la surface des cellules musculaires ce qui entrainerait la contraction (Ceccato., 2009).

La sommation des potentiels d'action produits à chacune des fibres musculaires d'un même motoneurone est regroupée sous le principe du potentiel d'action de l'unité motrice. Ce phénomène est appelé la sommation spatiale, la sommation temporelle quant à elle est définie

par un additionnement successif des potentiels d'action sur un même motoneurone. L'électromyographie (EMG) permet de mesurer l'activité musculaire lors de la marche ; c'est une méthode qui permet de détecter le signal électrique engendré par l'activation d'un muscle lors de mouvement. Le signal EMG résulte de la sommation des potentiels d'actions des différentes unités motrices (Ceccato., 2009).

Ainsi si l'on a par exemple 3 unités motrices d'un muscle : UM1 ; UM2 ; UM3, chacune d'elle générant un potentiel d'action (P_{UMi}) le signal EMG issu de ce muscle est la somme ($P_{UM1}+P_{UM2}+P_{UM3}$) (Ceccato., 2009) (Figure 8).

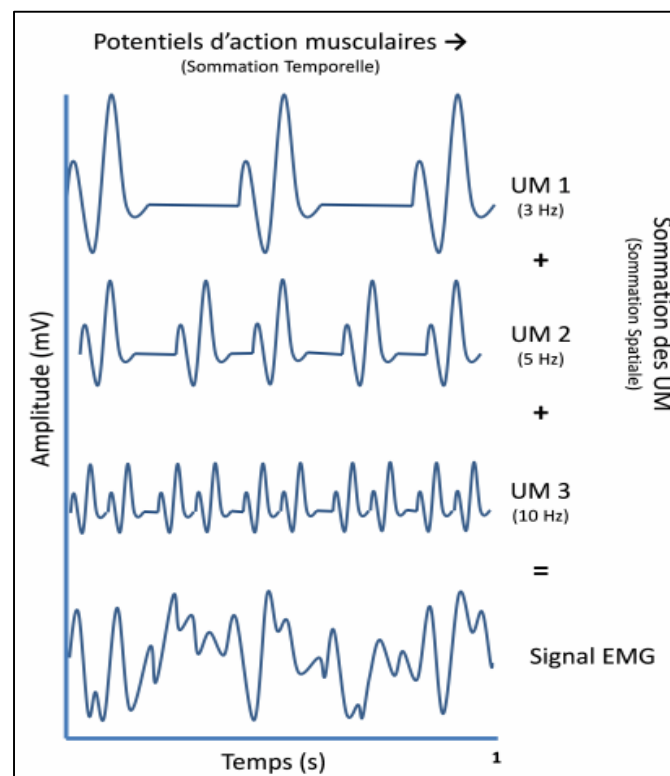


Figure 8. Le signal EMG résulte de la sommation des potentiels d'action des différentes unités motrices. Ici, trois unités motrices sont illustrées (UM1, UM2, UM3), chacune possède sa propre amplitude et fréquence de décharge (3Hz, 5Hz, 10 Hz) qui sont intégrées dans le signal EMG (Ceccato., 2009).

Chaque unité motrice possède sa propre amplitude et fréquence de décharge qui dépendent du nombre de terminaison nerveuses du motoneurone associé, ainsi qu'à la conformation anatomique de l'unité (Ceccato., 2009).

Chez le chat, lors de mouvement, chaque muscle émet un signal EMG détectable par des électrodes EMG placées en position sous cutanée au niveau du muscle, ce dernier étant lié à des câbles transcutanés de téflon (Drew & Rossignol., 1987). Cette méthode chirurgicale est très invasive est nécessite de multiples incisions, l'idéal serait de réaliser une tonte de la région

du muscle dont l'activité contractile est mesurée et de poser des électrodes à la surface de la peau (Ceccato., 2009)

À titre d'exemple, au niveau de l'épaule du chat, les activités musculaires de cinq muscles peuvent être mesurées ces derniers sont : le muscle supra-épineux (SSp), le deltoïde (p.spinale) (SpD), le deltoïde (p. Acromiale) (AcD), le grand rond (TrM) et le grand dorsal (LtD). Chaque muscle émet un signal caractéristique de son activité normale (ou même pathologique) et de son état de flexion ou d'extension lors des deux phases du cycle de marche (Drew & Rossignol., 1987) (Figure 9).

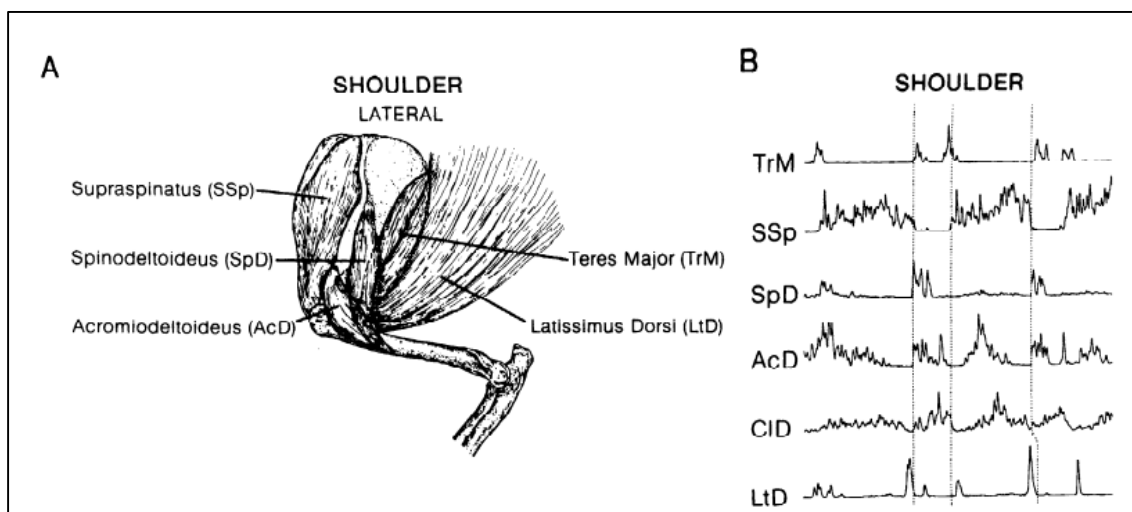


Figure 9. Illustration des origines et insertions des muscles de l'épaule (A) engendrant les signaux détectés en (B) lors de l'activité maximale de chacun pendant un cycle de marche. Les signaux ont été rectifiés et filtrés afin d'éliminer les bruits parasites, la constante de temps pour chaque graphe est de 20ms (Drew & Rossignol., 1987).

2. Étude dynamique du membre thoracique du chat

Afin de l'étudier d'un point de vue mécanique, le membre antérieur peut être divisé en trois segments à partir de son extrémité distale. Les segments sont, respectivement : le segment 1 qui correspond aux structures du métacarpe et des phalanges, le deuxième segment correspond au radius-ulna assemblés, le segment 3 correspond à l'humérus.

Chacun de ces os est lié à celui qui le précède par une articulation ayant un angle de rotation sur son axe vertical bien défini ainsi les angles θ_2 , θ_3 , θ_4 sont les angles respectifs aux articulations du carpe, du coude et de l'épaule, l'angle θ_1 est formé par l'axe des structures du carpe et de la surface d'appui du membre.

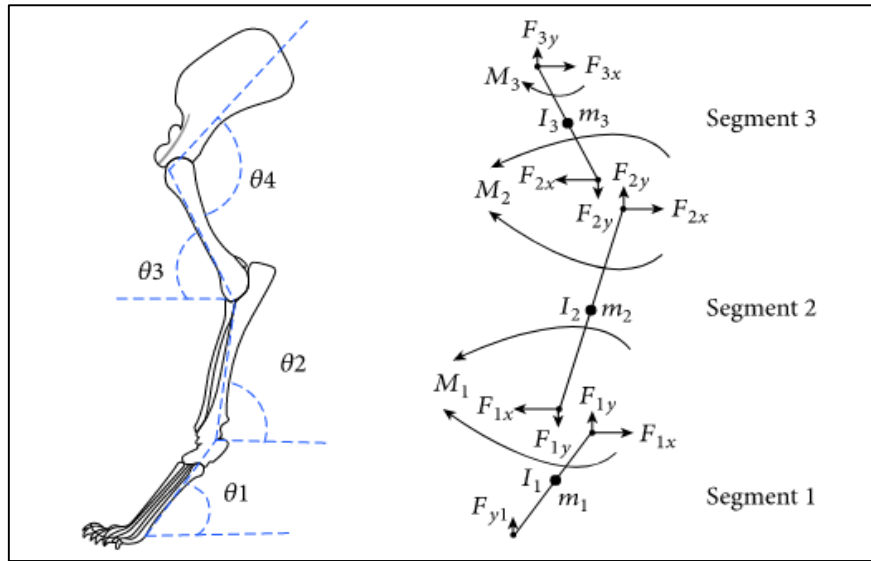


Figure 10. Représentation biomécanique du membre antérieur (Simo saarakkala., 2019).
 (à droite) les angles du membre antérieur ainsi que le diagramme du corps libre du même membre dans lesquels les forces de réaction et les moments agissants sur chaque articulation sont indiqués (à gauche).

Afin de faciliter l'étude dynamique du membre du chat les hypothèses suivantes doivent être appliquées (Simo Saarakkala., 2019) :

- chaque chat est un modèle de corps rigide à segment de liaison planaire.
- chaque segment de membre agit indépendamment sous une combinaison de forces de réactions articulaires, de moments musculaires articulaires et de gravité.
- seules les forces verticales de réactions articulaires par rapport à la surface de la terre sont prises en considération.

Selon le deuxième principe fondamental de la dynamique (Newton., 1687) ;

$$\sum F = ma$$

Ainsi par projection sur les deux axes du repère orthonormé, nous obtiendrons les deux formules :

$$\sum Fx = m \cdot a_x \quad (1)$$

$$Fx_p - Fx_d = m a_x \quad (2)$$

$$\sum Fy = m \cdot a_y = Fy_p - Fy_d - mg \quad (3)$$

D'après le théorème du moment cinétique appliqué sur le segment AB (Newton., 1687) :

$$\sum M = M i \cdot \alpha \quad (4)$$

Ou M_i et M sont respectivement les moments d'inertie et le moment cinétique du segment AB sur le plan de mouvement. En appliquant les formules 2,3 et 4 sur chaque segment Distincts de la figure (10) nous obtiendrons :

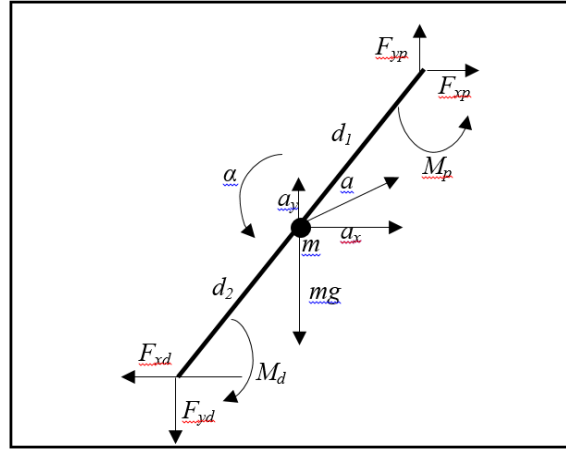


Figure 11. Diagramme de corps libre d'un seul segment du membre illustrant les forces, les moments ainsi que les accélérations linéaires et angulaires (Schéma personnel., 2021).

Segment 1 :

$$F_{1x} = m_1 \left(-\frac{d1}{2} (\theta_1')^2 \cos \theta_1 - \frac{d1}{2} (\theta_1'') \sin \theta_1 \right),$$

$$F_{y1} + F_{1y} - m_1 g = m_1 - \frac{d1}{2} (\theta_1')^2 \sin \theta_1 + \frac{d1}{2} (\theta_1'') \cos \theta_1,$$

$$M_1 + F_{1x} \frac{d1}{2} \sin \theta_1 + F_{1y} \frac{d1}{2} \cos \theta_1 - F_{1y} \frac{d1}{2} \cos \theta_1 = -I_1 \theta_1''$$

Segment 2 :

$$F_{2x} - F_{1x} = m_2 \left[-d_1 (\theta_1')^2 \cos \theta_1 + (\theta_1'') \sin \theta_1 - \frac{d2}{2} (\theta_2')^2 \cos \theta_2 + \theta_2'' \sin \theta_2 \right],$$

$$F_{2y} - F_{1y} - m_2 g = m_2 \left[d_1 (-\theta_1')^2 \sin \theta_1 + \theta_1'' \cos \theta_1 + \frac{d2}{2} (-\theta_2')^2 \sin \theta_2 + \theta_2'' \cos \theta_2 \right],$$

$$M_2 - M_1 + \frac{d2}{2} F_{2x} \sin \theta_2 - F_{2y} + \frac{d2}{2} \cos \theta_2 + F_{1x} + \frac{d2}{2} \sin \theta_2 - F_{1y} + \frac{d2}{2} \cos \theta_2 = -I_2 \theta_2''$$

Segment 3 :

$$F_{3x} - F_{2x} = m_3 \left[-d_1 (\theta_1')^2 \cos \theta_1 + \theta_1'' \sin \theta_1 - d_2 \theta_2' \cos \theta_2 + \theta_2'' \sin \theta_2 + d_3 \theta_3' \cos \theta_3 + \theta_3'' \sin \theta_3 \right],$$

$$F_{3y} - F_{2y} - m_3 g = m_3 \left[d_1 (-\theta_1')^2 \sin \theta_1 + \theta_1'' \cos \theta_1 + d_2 (-\theta_2')^2 \sin \theta_2 + \theta_2'' \cos \theta_2 + \frac{d3}{2} (-\theta_3')^2 \sin \theta_3 + \theta_3'' \cos \theta_3 \right],$$

$$M_3 - M_2 + F_{3x} \frac{d3}{2} \sin \theta_3 + F_{3y} \frac{d3}{2} \cos \theta_3 + F_{2x} \frac{d3}{2} \sin \theta_3 + F_{2y} \frac{d3}{2} \cos \theta_3 = I_3 \theta_3'' \quad (\text{Calcul personnel., 2021}).$$

Dans les prothèses bioniques, les articulations ainsi que les ligaments perdus sont substituées par des servomoteurs. L'étude biomécanique était une nécessité afin de déterminer le moment de force que le moteur doit livrer afin de permettre une rotation plus ou moins similaire à celle engendrée par l'action des muscles sur l'articulation dans les conditions normales.

La puissance du moteur n'est pas le seul paramètre qu'il faut prendre en considération mais également son poids. En effet, une prothèse trop lourde serait difficile à porter par un petit carnivore comme le chat, de plus l'augmentation du poids asymétrique d'une région du corps déplacerait le centre de masse (COM), ce qui va influencer l'équilibre postural et dynamique de l'animal.

La résistance du moteur aux facteurs extrinsèques (choc, température, humidité...), et intrinsèques (usure, durée de vie...etc.), le coût aussi est aussi un élément important lors du choix d'un servomoteur.

Tableau 1. Table de comparaison entre quelques modèles de servomoteurs communs utilisés en prototypes biomédicaux et robotiques (Table personnel., 2021)

Type	Modèle	Alimentation	Poids (g)	Moment (torque)	Angle de rotation	Prix/unité (DZD ou EUR)
Servomoteur standard	SG90	4.8 à 6 V _{cc}	9	2	[0°-180°]	700. DZD
Servomoteur analogique avec signal de feedback	S1123	4.8 à 6 V _{cc}	13.82	1.6kg/cm	[0°-120°]	1850. DZD
Servomoteur à rotation continue	AS3103	4.8 à 6 V _{cc}	38g	5.5 kg/cm	360° rotation continue	1265. DZD

V. Amputation du membre thoracique

Les indications de l'amputation du membre antérieur chez le chat incluent la néoplasie, les lésions dégénératives sévères du membre distal, les avulsions du plexus brachial, les contractures musculaires, les fractures, les paralysies, ou encore des contraintes d'ordre économique ne permettant pas une tentative de réparation chirurgicale (Langley-Hobbs & Montavon., 2009).

L'amputation du membre antérieur peut être réalisée au niveau de l'humérus proximal, par désarticulation de l'articulation scapulo-humérale ou par ablation de tout le membre, y compris l'omoplate (amputation du quartier avant). Il faut noter que la technique opératoire d'amputation du membre antérieur est similaire chez le chien et le chat. L'amputation du membre antérieur par l'humérus proximal est une procédure facile, mais elle est limitée aux cas où l'anomalie est située distalement par rapport à l'articulation du coude (Shulz., 2013).

L'épine scapulaire peut être partiellement retirée pendant l'opération ; pour éviter cela l'amputation par ablation de l'ensemble du membre antérieur y compris l'omoplate donne un meilleur résultat esthétique et est préférée par les auteurs (Straw., 1992), bien que cela implique une dissection légèrement plus importante. Les principaux vaisseaux sanguins et nerfs sont facilement visualisés, le matériel de section osseuse n'est pas nécessaire, et il ne reste pas d'épine scapulaire proéminente. Pour quelques tumeurs qui ne touchent que la moitié proximale de la scapula, il est possible de conserver la fonction du membre en ne retirant que la partie affectée avec des marges adéquates (O'Hagan., 2006).

1. Temps opératoires de l'amputation du membre antérieur

Deux techniques chirurgicales principales peuvent être utilisées pour le membre thoracique : (1) l'ablation de l'omoplate avec le membre, et (2) la désarticulation du membre au niveau de l'articulation scapulo-humérale. Si l'omoplate n'est pas retirée, après l'opération, les muscles restants vont s'atrophier. Cela va engendrer l'apparition de protubérances osseuses de l'omoplate qui deviennent proéminentes entraînant ainsi des escarres (Séguin., 2018).

1.1. Ablation du scapula avec le membre

Le chat est placé en décubitus latéral. Une incision cutanée en forme de T inversé est pratiquée, s'étendant de l'épine dorsale de l'omoplate à l'acromion. Puis l'incision s'étend crânialement sur le tubercule supérieur, et médialement dans l'aisselle en s'arrondissant au niveau du pli axillaire pour rejoindre l'incision latérale au niveau de l'acromion (Figure 12). Les veines axillo-

brachiale et omo-brachiale sont ligaturées et sectionnées à proximité du grand tubercule. La veine céphalique est ligaturée et sectionnée à distance du muscle cleidobrachial. Le muscle brachio-céphalique est sectionné près de la clavicule. Les muscles omo-transversaire et trapézoïde sont sectionnés le long du bord crânial de l'épine scapulaire. Le muscle latissimus dorsi (m. grand dorsal) est séparé du muscle grand rond et sectionné près de son insertion sur l'humérus (Langeley Hobbs & Montavon., 2009., Séguin., 2018).

L'omoplate est ensuite soulevée et les insertions des muscles rhomboïdes et du serratus (m. grand dentelé) sont sectionnées près de la face médiale de l'omoplate. Le m. supra scapulaire et les nerfs du plexus brachial sont sectionnés. Le ganglion lymphatique peut être retiré à ce moment-là si nécessaire. La veine et l'artère axillaires sont doublement ligaturées et sectionnées (Figure 12). Les muscles pectoraux superficiels et profonds sont sectionnés au niveau de leur attache sur l'humérus pour compléter l'ablation du membre (Shulz., 2013).

Les extrémités musculaires sectionnées sont inversées et apposées avec des sutures de matelassier. Les gaines aponévrotiques latérales du muscle latissimus dorsi, de l'omo-transversaire et du trapèze sont suturées aux gaines aponévrotiques latérales du muscle pectoral. Les tissus sous-cutanés et la peau sont suturés systématiquement, en prenant soin de fermer l'espace mort et de retirer l'excès de tissu du lambeau axillaire médian, de façon à ce qu'une plus grande partie de la peau brachiale latérale (plus épaisse) soit conservée, afin d'obtenir un résultat esthétique (Séguin., 2018).

1.2. La désarticulation du membre au niveau de l'articulation scapulo-humérale

Le chat est placé en décubitus latéral. Une incision cutanée est pratiquée de manière circonférentielle autour du membre. L'incision commence au niveau de la grande tubérosité de l'humérus, en restant latéral au membre ; elle s'incurve distalement jusqu'au niveau médian du bras pour se terminer au point caudal de l'espace axillaire (Séguin., 2018).

Une incision plus droite est réalisée médialement, elle ne s'étend pas aussi loin en direction distale, afin que le lambeau de peau latéral puisse être utilisé ultérieurement pour recouvrir le moignon (Figure 13).

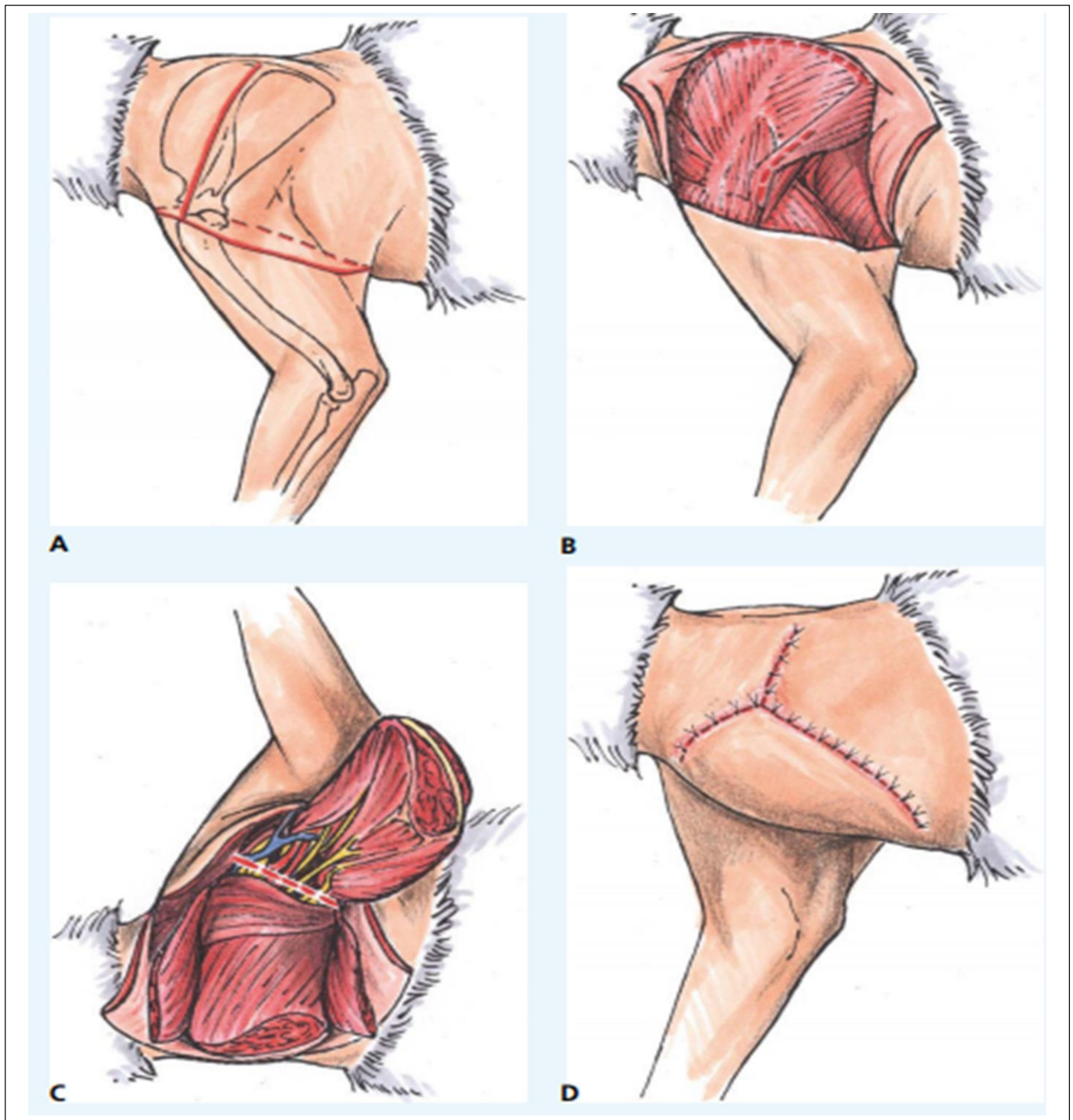


Figure 12. Amputation du premier quartier avec la scapula (Langley-Hobbs & Montavon., 2009).

(A) Incision cutanée en forme de T pour l'amputation du quartier avant.

(B) Les muscles sont sectionnés le long du scapula.

(C) la scapula est rétractée latéralement, et les muscles médians sont soulevés de l'os. Les nerfs du plexus brachial sont sectionnés et l'artère et la veine axillaire sont ligaturées.

Les muscles restants sont sectionnés pour libérer la scapula.

(D) Muscles apposés pour minimiser l'espace mort, le sous-cutané et la peau sont suturés

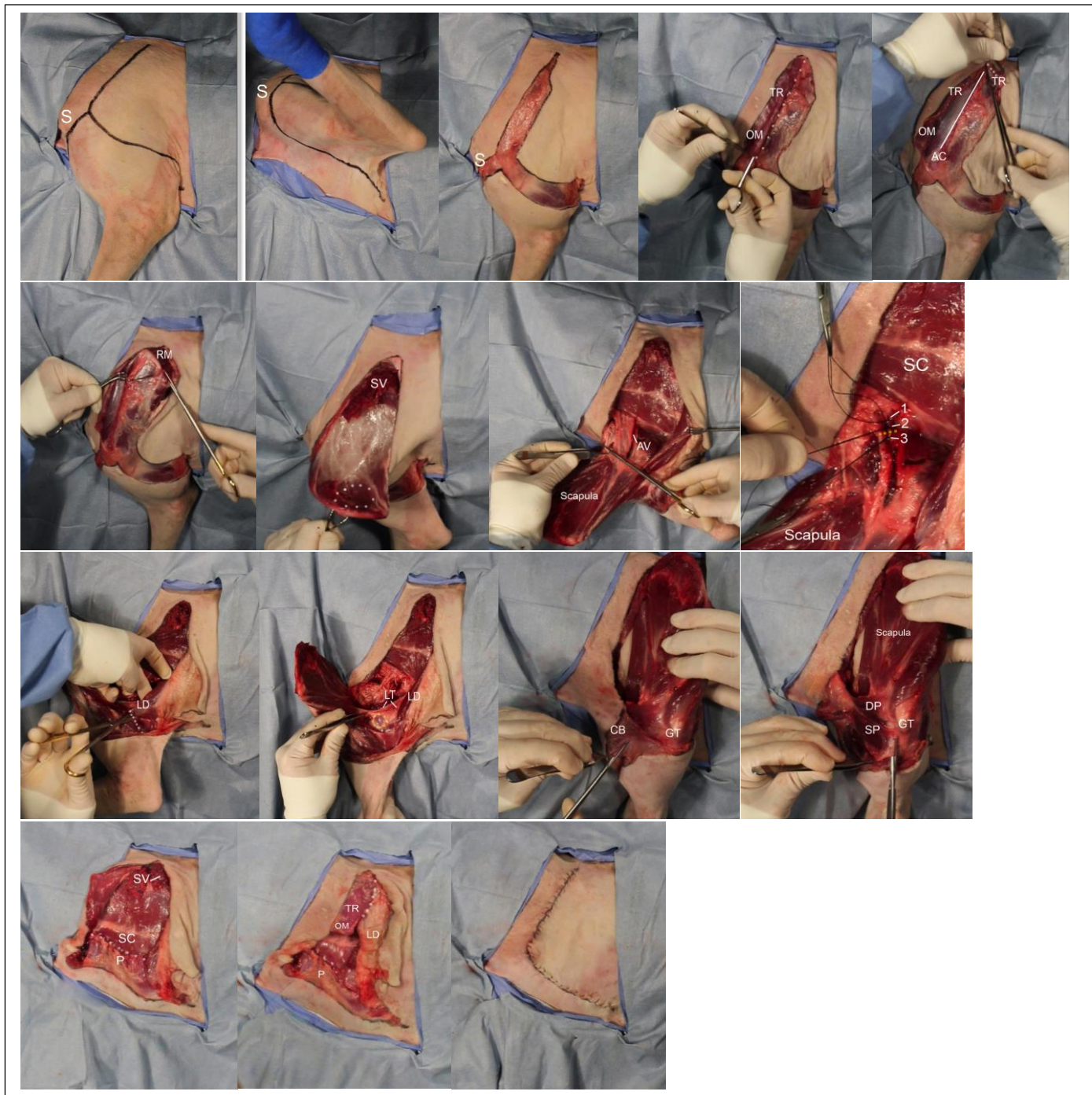


Figure 13. Étapes successives d'une amputation du membre thoracique d'un chien (incluant la scapula) (Smeak., 2012)

La peau distale de l'incision est disséquée du tissu sous-cutané jusqu'au niveau de l'articulation du coude, de manière circonférentielle. Les muscles cleidobrachial et brachio-céphalique superficiels sont sectionnés cranio-médialement. L'artère brachiale, située caudalement au muscle biceps sur la face médiale du membre, est doublement ligaturée et sectionnée proximale (Séguin., 2018).

La veine céphalique est ligaturée au même niveau et divisée lorsqu'elle passe crânialement sous le muscle cleidobrachial. Les nerfs médians, ulnaires et musculo-cutané sont nettement divisés. Le tendon des muscles triceps, brachial et biceps sont sectionnés à proximité de leurs sites d'insertion autour de l'articulation du coude pour minimiser les saignements (Figure 14).

La veine céphalique est ligaturée sur la face latérale du membre. Le nerf radial est identifié et disséqué de façon nette. Les deux structures sont sectionnées à leur aspect proximal et les attaches musculaires latérales restantes sont sectionnées près de l'articulation du coude (Figure 14). Le muscle cleidobrachial est sectionné à son insertion sur la partie distale de la crête humérale. La portion acromiale du muscle deltoïde est sectionnée au niveau de son insertion sur la tubérosité deltoïde de l'humérus est réfléchi en direction proximale. Le fascia brachial est incisé distalement le long du bord crânien du chef latéral du muscle triceps. Jusqu'au niveau de l'olécrane. Le tendon du muscle triceps brachial est complètement isolé et sectionné juste à proximité de l'olécrane. La jambe est ensuite levée pour permettre l'accès à la face médiale du membre. Les muscles pectoraux superficiels sont sectionnés au niveau de leur insertion. Le muscle pectoral profond peut alors être visualisé et est sectionné à son insertion sur les tubercules mineur et majeur de l'humérus et l'aponévrose médiale du bras. Le tronc commun cutané qui passe latéralement aux vaisseaux et aux nerfs, est sectionné et réfléchi pour exposer les principales structures neurovasculaires. L'artère brachiale est isolée, doublement ligaturée et divisée entre sa branche brachiale profonde et sa branche bicipitale. La veine brachiale est ligaturée séparément et sectionnée au même niveau.

Les nerfs médian et cubital, caudaux à l'artère brachiale, sont perfusés avec de la bupivacaïne et sectionnés de façon nette. Le nerf radial est sectionné lorsqu'il passe latéralement à l'artère brachiale. Le nerf musculo-cutané est sectionné au moment où il passe en avant des nerfs et des vaisseaux qui viennent d'être décrits. L'artère humérale circonflexe crânienne est sectionnée au niveau de qu'elle se ramifie à partir de la partie proximale de l'artère brachiale (Langley-Hobbs & Montavon., 2009., Séguin., 2018).

Les vaisseaux et les nerfs sectionnés sont rétractés de façon à ce que l'insertion combinée du muscle grand dorsal, du teres major et des muscles troncs cutanés puisse être sectionnée à partir

de la tubérosité deltoïde de l'humérus. Le fascia le long de la bordure crâniale du muscle tenseur du fascia antébrachial est incisé distalement et rétracté caudalement. La division entre les chefs ; médial et accessoire et les chefs latéral et long du muscle triceps brachial est exposée. Le muscle triceps brachial est séparé de manière émoussée de sorte que les chefs médial et accessoire restent avec le membre amputé. Les chefs médial et accessoire sont sectionnés en distal du tendon tricipital. Les branches de l'artère collatérale cubitale, qui alimentent la partie distale du muscle triceps brachial, sont sectionnées au moment où elles pénètrent dans le long chef du muscle triceps brachial. L'artère brachiale profonde est toujours intacte et alimente les chefs latéral et long du muscle triceps brachial (Séguin., 2018).

L'étape finale est la division des muscles proches de l'articulation ensuite le moignon est fermé par une suture du tendon du muscle triceps brachial crânialement à l'aponévrose du muscle pectoral superficiel. L'aponévrose des muscles sus-épineux et deltoïde est suturée à l'aponévrose du muscle cleidobrachial. Les tissus sous-cutanés et la peau sont fermés de manière habituelle (Séguin., 2018).

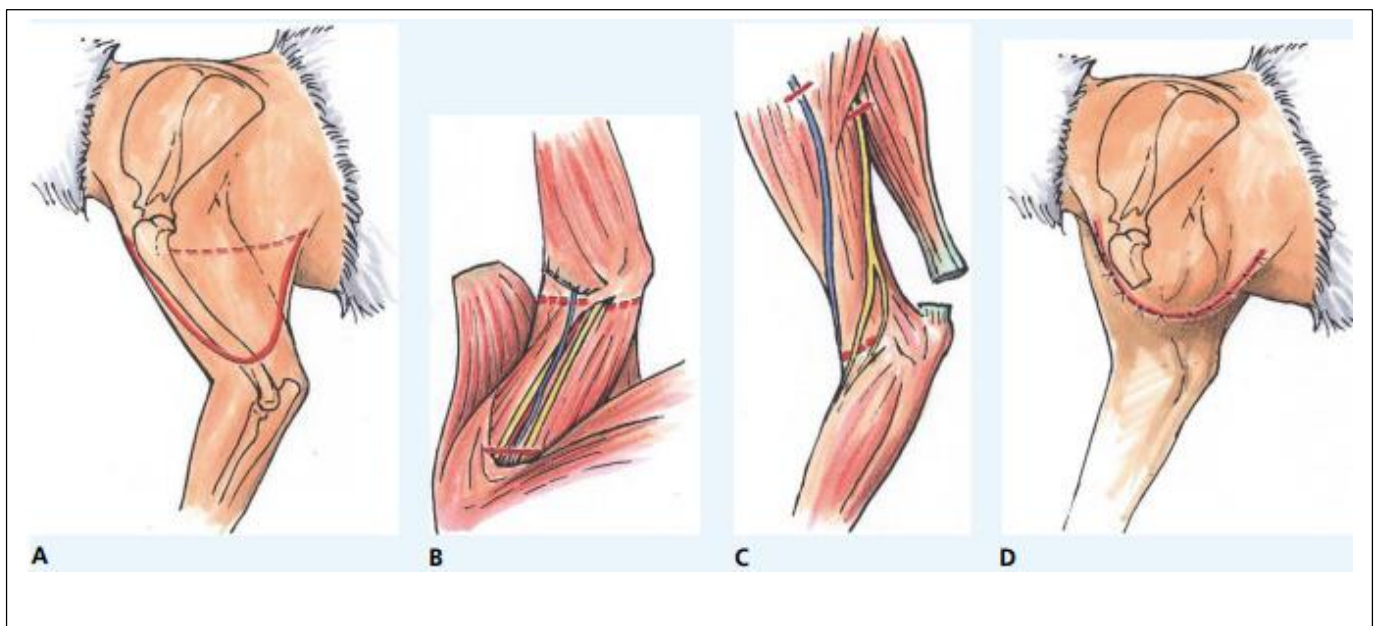


Figure 14. Amputation du membre au niveau de l'humérus proximal (Langley-Hobbs & Montavon., 2009).

A, Incision cutanée avec la courbe latérale s'étendant jusqu'à l'humérus distal. B Le membre antérieur est retourné pour atteindre le côté médial. Les vaisseaux sont ligaturés, les vaisseaux et nerfs sont sectionnés proximalelement ; les muscles sont sectionnés près de l'articulation du coude. C, Latéralement, le nerf radial est sectionné, la veine céphalique ligaturée et sectionnée du coté proximal ; les muscles sont sectionnés près de l'articulation du coude. D, L'humérus est sectionné dans la région métaphysaire proximale, les muscles sont apposés pour minimiser l'espace mort, et le sous-cutané et la peau sont suturés.

2. Étiologie des amputations

Les causes auxquelles une amputation peut être une éventuelle thérapie sont variable elles peuvent être des tumeurs des malformations des traumatismes ou même des infections :

2.1. Les néoplasmes musculosquelettiques malins communs chez le chat

Trois types de néoplasmes peuvent être discriminés, à savoir :

a) L'ostéosarcome

L'ostéosarcome est la tumeur osseuse primaire la plus fréquente chez le chat ; il représente plus de 70 % de toutes les tumeurs osseuses primaires signalées chez les chats (Heldmann & Anderson., 1995). Les chats d'âge moyen à avancé sont les plus fréquemment signalés, bien que des chats de 3,5 mois seulement ont été cités (Quigley & Leedale., 1983). Les ostéosarcomes appendiculaires et axiaux semblent être distribués de manière égale, bien qu'une étude ait cité 68% des cas survenant sur le squelette appendiculaire (Bitetto & Patnaik., 1984). Au sein du squelette appendiculaire, les membres postérieurs sont plus fréquemment affectés que les membres antérieurs. Indépendamment du site primaire, l'ostéosarcome félin est localement invasif et lent à métastaser (Bitetto & Patnaik., 1984). Le suivi par radiographies de la lésion primaire et du thorax est conseillé pour exclure les métastases ; une évaluation pré chirurgicale avec une NFS, un profil biochimique et une analyse urinaire est justifiée pour exclure une maladie concomitante. Une résection chirurgicale agressive (c'est-à-dire l'amputation) est souvent curative. Si une résection complète est impossible (par ex, en raison d'une atteinte du squelette axial), la radiothérapie est une option raisonnable, bien qu'aucune étude ne documente la valeur de ce traitement. Peu de rapports sont disponibles sur l'utilisation de la chimiothérapie pour les chats atteints d'ostéosarcome non résécable. Une thérapie combinée de vincristine (Oncovin ND), cyclo-phosphamide et méthotrexate a été associée à une rémission partielle chez un chat atteint d'ostéosarcomes pelvien. Le carboplatine a été utilisé chez deux chats avec un ostéosarcome extra squelettique, dont l'un a connu une diminution de la taille pendant le traitement, ce qui a permis une chirurgie curative (Spugnini & Ruslander., 2001).

b) Les fibrosarcomes et chondrosarcomes

Les fibrosarcomes sont des sarcomes malins des tissus mous qui proviennent des fibroblastes. Ils représentent 7 à 15 % de toutes les tumeurs cutanées chez les chats. L'incidence chez les chats peut varier selon les régions, en fonction des mesures de vaccination. Les incidences rapportées sont également sujettes à modification car un nombre croissant de tumeurs à cellules

fusiformes sont classées comme des types spécifiques (par exemple, le neurofibrosarcome, qui est maintenant classé comme une tumeur de la gaine du nerf périphérique). Le pronostic est réservé en raison d'un mode de croissance invasif et de l'impossibilité d'enlever la tumeur complètement (van Nimwegen & Kirpensteijn., 2018).

Le chondrosarcome (CSA) osseux primaire est lui aussi une tumeur rare chez le chat. La résection chirurgicale agressive est la principale recommandation de traitement (Chun., 2005).

2.2. Les malformations congénitales du membre antérieur

Plusieurs déformations au niveau des phalanges du chat peuvent être observés qu'elles soient génétiques ou congénitales elles peuvent affecter plus au moins la démarche de l'animal. Parmi ces dernières nous citons :

La polydactylie (Figure 15) qui est une anomalie génétique ou congénitale qui consiste en l'existence de doigts surnuméraires. La polydactylie, chez les mammifères quelle que soit l'espèce, est généralement transmise selon un mode autosomique dominant à pénétrance incomplète et à expressivité variable. Parfois elle fait partie d'un syndrome associant plusieurs malformations, pouvant aller d'une morbidité légère à la létalité (Perrin & Tonkin., 2008).

Il existe peu de littérature scientifique récente concernant la polydactylie féline, cependant, elle est répandue chez les chats sans pedigree (dits « de gouttière »), en particulier aux États Unis et au Canada (Todd., 1976).

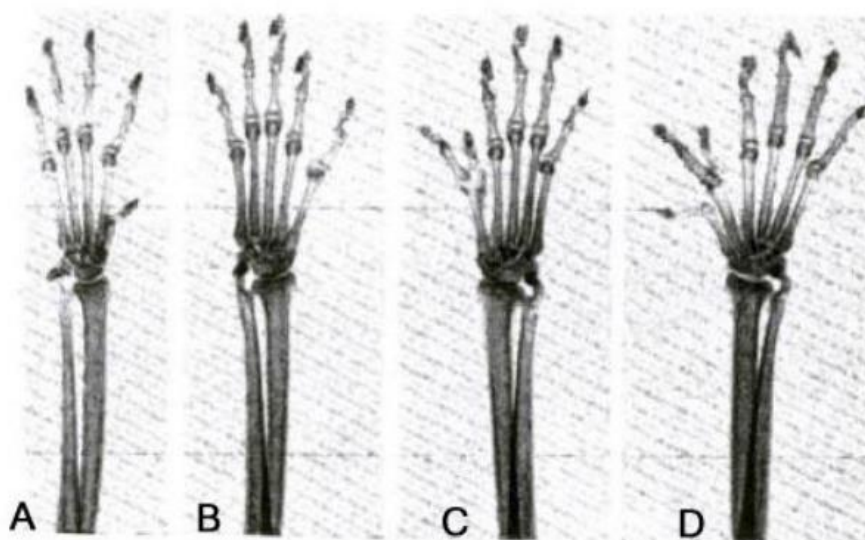


Figure 15. Variabilité d'expression de la polydactylie féline, membres antérieurs (Danforth., 1947).



Figure 16. Photographie d'un chat présentant une polydactylie dite « en moufle » aux antérieurs (source : www.hemingwayhome.com).

Les doigts supplémentaires sont bien détachés et du côté du pouce (polydactylie pré-axiale).



Figure 17. Photographie des antérieurs d'un chat présentant une polydactylie dite « en raquette » (Valloire-Lucot., 2012).

L'hémimélie ou agénésie radiale (hypoplasie ou aplasie du radius) (Figure 18), est une anomalie du développement caractérisée par l'absence ou une hypoplasie sévère du radius rarement signalée chez les chats. L'étiologie de l'hémimélie radiale reste mal connue (Plummer *et al.*, 1993).

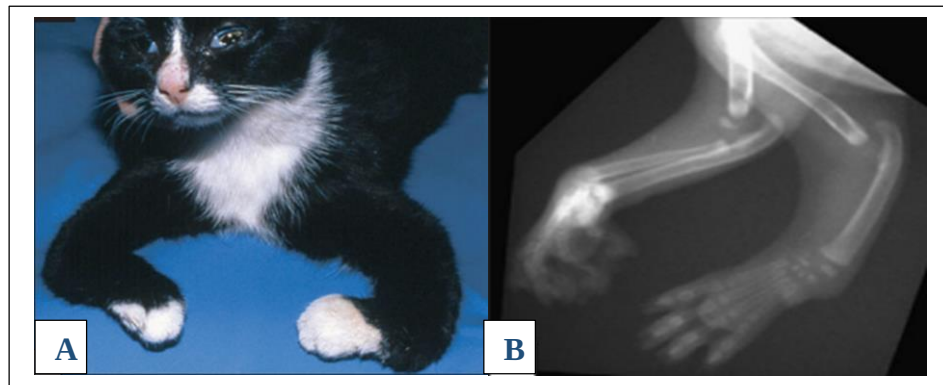


Figure 38. Cas d'hémimélie radiale. (Scott & McLaughlin., 2007)

A, hémimélie radiale chez un chat. B, Radiographie des membres antérieurs d'un chat atteint d'une hémimélie radiale

Dans de rares cas, les chats montrent une ou plusieurs phalanges manquantes, c'est le cas de l'ectrodactylie ou aplasie digitale.

Parmi les malformations congénitales que l'on peut rencontrer rarement aussi mais qui touchent cette fois un ou plusieurs segments du membre, la brachymélie. Cette malformation est caractérisée par le raccourcissement de l'os, ce qui donne des individus à membres trop court le plus souvent non fonctionnels. Elle touche le plus souvent les membres antérieurs car ces derniers présentent deux os séparés (le radius et l'ulna) dont la croissance peut être asynchrone (Cornillie & *al.*, 2003).



Figure 19. Chaton de 4 semaines avec des membres et une queue raccourcis (Cornillie *et al.*, 2003).



Figure 20. Chaton de 4 semaines avec des membres et une queue raccourcis (Cornillie *et al.*, 2003).

2.3. Les traumatismes

Les indications courantes pour une amputation liée aux traumatismes incluent les fractures et leurs complications, telles que le retard d'union, la non-union, et la contraction musculaire résultant d'une cicatrisation d'une guérison inappropriée de la fracture ou d'une avulsion cutanée (Motta & Hill., 2018).

Certaines fractures comminutives de la diaphyse impossibles à réduire par les techniques orthopédiques communes ainsi que les fractures ouvertes par exemple présentent un risque de complication septique nécessitant une ablation du membre (Motta & Hill., 2018).

D'autre part, une amputation ne concerne pas uniquement les parties supérieures des membres, elle peut être pratiquée sur un seul doigt. L'amputation d'un doigt peut être indiquée comme traitement de fractures comminutives, de non-unions, de fractures intra-auriculaires, de luxations irréparables, de blessures par cisaillement, de néoplasie ou d'infections chroniques du doigt. L'amputation est généralement réalisée au niveau de l'articulation métacarpo/métatarso-phalangienne, bien que l'ablation au niveau de l'articulation interphalangienne proximale ou distale puisse également être réalisée (McLaughlin & Scott. 2007).

2.4. Les infections

Ce sont les affections dues à des bactéries. Elles peuvent être primaires (dus à une septicémie générale par exemple) ou secondaire à une complication septique d'une intervention chirurgicale ou lors de convalescence. Parmi les complications septiques liées aux traumatismes et aux interventions chez le chat :

a) L'arthrite septique

L'arthrite septique (arthrite infectieuse, arthrite suppurative) est une infection articulaire causée par des organismes bactériens. Elle peut être due à une propagation hématogène de l'infection à partir d'infections respiratoires, digestives, urinaires, ombilicales ou valvulaires, mais le plus souvent elle est causée par une inoculation bactérienne directe dans les articulations à la suite d'un traumatisme pénétrant. Les organismes courants comprennent les staphylocoques, les streptocoques, les *Corynebacterium* spp, et les coliformes. La contamination bactérienne de la synoviale provoque inflammation et favorise l'extravasation de fibrine, de facteurs de coagulation et de leucocytes polynucléaires. Le dépôt de fibrine sur les surfaces cartilagineuses articulaires inhibe la pénétration du liquide synovial. Les leucocytes phagocytent les bactéries et libèrent des enzymes lysosomales qui décomposent la matrice du cartilage et les tissus de l'articulation. Finalement, le processus infectieux envahit l'os sous chondral, provoquant une

ostéomyélite bactérienne. Le pronostic de fonctionnement normal de l'articulation varie et dépend de la quantité de cartilage qui a été détruite. Les procédures de sauvetage des articulations chroniquement douloureuses comprennent l'arthrodèse ou l'amputation. Le remplacement de l'articulation peut être possible après la résolution de l'infection, bien que le risque de récurrence de l'infection soit considérablement accru. Le pronostic des animaux atteints d'endocardite bactérienne est mauvais s'il existe une insuffisance cardiaque imminente secondaire à un dysfonctionnement valvulaire, en particulier une insuffisance valvulaire aortique (Shulz., 2013).



Figure 41. Radiographies du jarret gauche d'un chat atteint de polyarthrite érosive à *Mycoplasma gateae* (Lemetayer Taylor., 2014)

Notez le gonflement des tissus mous péri articulaires, le motif trabéculaire grossier dans les os adjacents au jarret. Foyers radio transparents de lyse osseuse sous-chondrale (flèches) focale observés dans l'épiphyse distale du tibia et de la fibula, de l'astragale, du calcanéum, des os du tarse et du métatarsien proximal.

b) L'ostéomyélite

L'ostéomyélite bactérienne post-traumatique est peu fréquente chez le chat et survient généralement après une réduction ouverte d'une fracture, lors de traitement de fractures ouvertes ou de morsures. En comparaison avec les chiens, l'extension locale d'une infection est due à la mauvaise prise en charge du patient souffrant d'un traumatisme orthopédique (Shulz., 2013). L'infection des plaies des tissus mous impliquant les extrémités distales est une cause plus fréquente d'ostéomyélite (Dow., 1986).

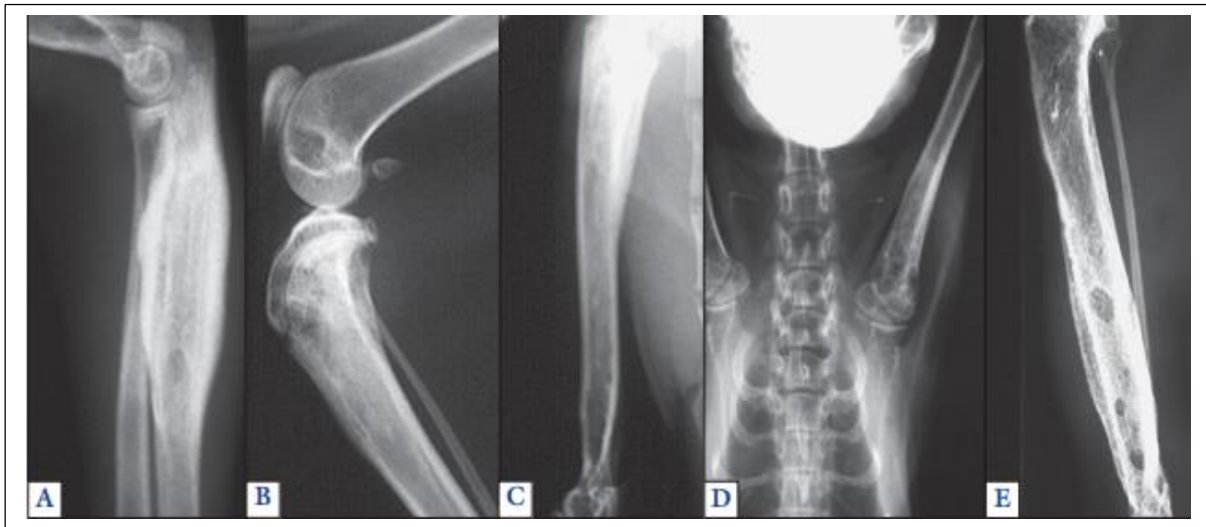


Figure 22. Radiographies du membre pélvien d'un chat atteint d'ostéomyélite (Lemetayer Taylor., 2014)

A, Vue radiographique latérale d'un cubitus présentant une ostéomyélite secondaire à une morsure. Une sclérose et un séquestre osseux sont visibles. B, Radiographie latérale d'une articulation du grasset avec ostéomyélite affectant la tubérosité tibiale. C, Radiographie latérale d'un humérus avec ostéomyélite de la métaphyse proximale et de la diaphyse. Notez la sclérose osseuse et la prolifération du périoste ; D, Vue radiographique crâniocaudale d'un humérus avec ostéomyélite pyogranulomateuse. Notez la lyse osseuse et la perte du schéma trabéculaire normal dans l'humérus proximal ; E, Radiographie latérale d'un tibia présentant une ostéomyélite secondaire à une morsure. La lyse, la réaction du périoste et la sclérose sont évidentes dans la diaphyse et la métaphyse distale.

c) La gangrène

La gangrène est une nécrose des tissus causée par une embolie, un choc, une infection ou fait suite à une gelure. L'interruption prolongée ou le ralentissement extrême de l'irrigation sanguine peuvent être à l'origine de la gangrène. Parmi les gangrènes rencontrées chez le chat et qui touchent les membres suite à un choc septique ou à une thromboembolie ; la gangrène périphérique symétrique qui est une lésion ischémique distale symétrique touchant au moins deux extrémités, sans d'obstruction artérielle proximale et de vasculite (Casey & Dickinson., 2019).

Les infections des plaies ou la dissémination de certains germes à partir d'un foyer infectieux voisins peuvent provoquer une nécrose d'une partie du membre c'est le cas par exemple de la fasciite nécrosante dont les germes incriminés chez le chat sont : *Staphylococcus haemolyticus*, *S. canis*, *Enterococcus faecalis* et *E. coli* (Plavec & Zdovc., 2015).



Figure 23. Photographie d'une gangrène des membres d'un chat
(À gauche) une plaie de l'avant-bras chez un chat suite à une gangrène
provoquée par une morsure. Notez la nécrose complète des tissus. (à
droite) plaie traumatique de l'extrémité suite à un accident de la circulation
chez une chienne Beagle avec avulsion cutané de l'extrémité du membre
postérieur (Clinique vétérinaire ABvet).

V. Discussion

Les résultats de notre recherche bibliographique ont montré que le membre antérieur du chat est une entité anatomique complexe qui englobe plus des différents types d'os qui la composent une musculature extrinsèque et intrinsèque. La première joue surtout un rôle de renforcement, la deuxième contribue aux différents mouvements qui dépendent de l'activité contractile des muscles qui sont de ce fait soit des muscles extenseurs soit des muscles fléchisseurs. Les muscles intrinsèques du membre antérieur s'insèrent tous sur le squelette appendiculaire (Hudson & Hamilton., 2010).

Parmi les mouvements auxquels le membre antérieur du chat contribue on rencontre la locomotion. Chez cet animal le mode de déplacement commun est la quadrupédie (Bhatti & Waqas., 2017).

Toute étude biomécanique s'intéresse en premier lieu à deux aspects majeurs : un aspect cinématique qui dans notre cas a pris en considération la posture, la marche et l'initiation de la marche. Le deuxième aspect dit dynamique prend en considération les forces interagissant avec le système étudié (le membre thoracique). Les différents segments du membre thoracique ont été représentés à l'aide du diagramme de corps libre tout en respectant les hypothèses ci-dessous (Simo Saarakkala., 2019) :

- Chaque chat est un modèle de corps rigide à segment de liaison planaire.
- Chaque segment de membre agit indépendamment sous une combinaison de forces de réactions articulaires, de moments musculaires articulaires et de gravité.
- Seules les forces verticales de réactions articulaires par rapport à la surface de la terre sont prises en considération.

Comme précisé dans l'introduction l'objectif de cette étude orthopédique était de servir d'une base à un éventuel projet de réalisation d'une prothèse du membre thoracique chez le chat. De ce fait l'étude des amputations du membre antérieur était une nécessité afin de connaître les techniques chirurgicales et les affections en cause de ces dernières. Les techniques chirurgicales d'amputation du membre thoracique sont au nombre de deux : **l'amputation par désarticulation scapulo-humérale** ou **l'amputation de tout le premier quartier (y compris le scapula)** (Séguin., 2018).

D'autre part les causes des amputations que nous avons pu répertorier étaient principalement et par ordre d'importance décroissant :

- Les traumatismes ; ces derniers incluent les fractures et leurs complications, telles que le retard d'union, la non-union, et la contraction musculaire résultant d'une cicatrisation d'une guérison inappropriée de la fracture ou d'une avulsion cutanée (Motta & Hill., 2018).
- Les infections d'origine bactériennes à savoir : les arthrites septiques les ostéomyélites et les gangrènes.
- Les néoplasmes musculosquelettiques communs chez cette espèce. Parmi les tumeurs malignes qu'il faut redouter le plus chez le chat on trouve l'ostéosarcome qui représente plus de 70% des tumeurs osseuses chez cette espèce (Heldmann & Anderson., 1995).
- Les malformations congénitales ; bien que ces dernières soient peu fréquentes nous avons mentionné : la polydactylie, la brachymélie et l'hémimélie radiale.

La fabrication d'une prothèse pour un animal de compagnie qui a perdu un membre ou plus est de nos jour envisageable. Parmi les types de prothèses on retrouve les prothèses passives (inanimées) et les prothèses actives qui assurent une certaine mobilité. Ces dernières sont :

- **La prothèse mécanique à forces internes.**
- **La prothèse hydraulique**
- **Les prothèses EMG/EEG**

Jusqu'à présent les tentatives de réalisation de prothèses pour animaux de compagnie se concentrent sur les prothèses mécaniques à force interne. Les prothèses bioniques contrôlées par les signaux électriques du corps sont dédiées à l'homme (Stokosa., 2021).

VI. Conclusion

D'après cette étude bibliographique portant sur la biomécanique et l'orthopédie du membre antérieur du chat il est possible de constater que sur le plan biomédical le chat domestique est un très bon sujet pour une prothèse bionique du fait du système musculosquelettique qu'il possède. Cependant comme une prothèse EMG exploite un signal électromyographique de bonne amplitude, Dans la mesure du possible une bonne masse musculaire doit être préservée lors des pratiques chirurgicales visant l'amputation totale ou partielle (avant-bras seulement) du membre thoracique. Ces dernières mesures doivent être envisagées par consentement entre le propriétaire et le chirurgien

D'autres points liés à la biomécanique de la marche telle que la synchronisation du membre bionique avec les membres restants antérieur et postérieurs ainsi que le mode de vie du chat aussi influenceront la conception de la prothèse. Qui de ce fait doit être réalisée sur mesure pour chaque chat. Ainsi sur un plan expérimental les mesures des longueurs, circonférence et même l'estimation du poids des parties perdues sont importantes étant donné que la bibliographie ne peut conférer ces données variables d'un individu à l'autre.

D'autre part, vu les caractéristiques anatomiques du chat on ne peut espérer que la prothèse bionique substituera à 100% les fonctions du membre perdu mais permettra au moins une démarche plus au moins normale de l'animal lui conférant une meilleure qualité de vie.

Références bibliographiques :

- Bahatti Z, A. Waqas, A. W. Mahesar, M. Karbasi. *Gait Analysis and Biomechanics of Quadruped Motion for procedural Animation and Robotic Simulation*. Bahria University Journal of Information & Communication Technologies. (2017). Vol. 10, Issue II.
- Barone R, Anatomie comparée des mammifères domestiques. Tome 2 Arthrologie et myologie,. Edition Vigot,1986; p 373
- Barone R. Anatomie comparée des mammifères domestiques. Tome 1 Ostéologie, Vigot, 1986., Chapitre VI ; p451, 455, 477, 511, 537, 569.
- Bitetto W.V., Patnaik A.K., Schrader S.C, Osteosarcoma in cats: 22 cases (1974– 1984). *J Am Vet Med Assoc.*, 1987, **190**:91-3
- Ceccato J.C. Le tronc, de la locomotion à la commande. Sciences de l'ingénieur [physics]. *Thèse de doctorat Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc*, 2009.
- Casey, K., & Dickinson, A. Suspected symmetrical peripheral gangrene in a cat. *Journal of Feline Medicine and Surgery Open Reports*, (2019). 5(1).
- Chandler J.C., Beale, B.S. Feline orthopedics. *Clinical Techniques in Small Animal Practice*, 2002, **17**(4), 190-203.
- Cheick Dienta F. (2007). Etude des complications de l'amputation des membres inférieurs dans le service de Chirurgie Orthopédique et traumatologique du CHU Gabriel Touré. p51-53.
- Chun R. Common Malignant Musculoskeletal Neoplasms of Dogs and Cats. *Veterinary Clinics of North America: Small Animal Practice*, 2005, **35**(5), 1155-1167.
- Cornillie P., Van Lancker S., Simons, P. Two Cases of Brachymelia in Cats. *Anatomia, Histologia, Embryologia: Journal of Veterinary Medicine Series C*, 2004 **33**(2), 115–118.
- Cornu O., Van Cauter M, Dubuc J.E, Cyr Yombi J. Arthrites séptiques aigue. (2013). *Manuel du Service d'orthopédie des Cliniques universitaires Saint-Luc (Bruxelles-Woluwe)* Pages 1-9.
- Dirschl D.R., Wilson F.C. Topical antibiotic irrigation in the prophylaxis of operative wound infections in orthopedic surgery. *Orthopedic Clinics of North America.*, 1991, **22**: 419-26.
- Dow S.W., Jones R.L., Adney W.S. Anaerobic bacterial infections and response to treatment in dogs and cats: 36 cases (1983–1985). *Journal of the American Veterinary Medical Association.*, 1986, **189**: 930-4.
- Drew, T., & Rossignol, S. A kinematic and electromyographic study of cutaneous reflexes evoked from the forelimb of unrestrained walking cats. *Journal of Neurophysiology*, 1987, **57**(4), 1160–1184.

Durfee, W.K., Iaizzo, P.A.. Medical Applications of 3D Printing. *Engineering in Medicine*. 2019., 527–543.

Forster, L. M., Wathes, C. M., Bessant, C., & Corr, S. A. (2010). Owners' observations of domestic cats after limb amputation. *Veterinary Record*, 167(19), 734–739.

Hayot C, Lacouture P, Sakka S. Analyse biomécanique 3D de la marche humaine : Comparaison des modèles mécaniques. *Thèse de doctorat université de Poitiers*. 2010, Pages :31-38.

Heldmann E, Anderson M.A, Wagner-Mann C. Feline osteosarcoma: 145 cases (1990– 1995). *J Am Anim Hosp Assoc.*, 2000, **36**:518–21.

Hudson L & Hamilton W. Atlas for feline anatomy for veterinarians, Edition: *Teton new media*, 2010; p34, p 36- 37, p48-49, p54, p60-61, p64-65.

Jarrell, J. R., Farrell, B. J., Kistenberg, R. S., Dalton, J. F., Pitkin, M., & Prilutsky, B. I. (2018). Kinetics of individual limbs during level and slope walking with a unilateral transtibial bone-anchored prosthesis in the cat. *Journal of Biomechanics*, 76, 74–83.

Langley-Hobbs S., Montavon P. Feline orthopedic surgery and musculoskeletal disease. *Edition: Saunders WB*. 2009. Chapitre 42.pages: 527-531.

Lemetayer J and Taylor S. *Journal of Feline Medicine and Surgery*. 2014, **16**, 547–562.

Marion P. Proposition de combinaisons optimales de contractions volontaires maximales isométriques pour la normalisation de 12 muscles de l'épaule. Département de kinésiologie, Faculté des arts et des sciences. Université de Montréal. 2014. Chapitre 1 : 9-51

McEntee M.C, Page R.L, Novotney C.A, citer tous les auteurs. Palliative radiotherapy for canine appendicular osteosarcoma. *Vet Radiol and Ultrasound.*, 1993,**34**:367–70.

Menchetti, M., Gandini, G., Gallucci, A., Della Rocca, G., Matiassek, L., Matiassek, K. Rosati, M. Approaching phantom complex after limb amputation in the canine species. *Journal of Veterinary Behavior.*, 2017, **22**, 24–28.

Mohamed El ghazali., El-behery E.I. Comparative morphological interpretations on the bones of the pelvic limb of New Zealand rabbit (*Oryctolagus cuniculus*) and domestic cat (*Felis domestica*).*JAVAR*. 2018, 5(4):410-419.

Nicogossian J. « La prothèse de guerre : réparation du corps du soldat », Corps, 2010, p. 225-232

Noble P., Collin B., Denoix J.M., Seryteyn D. L'étude des contraintes mécaniques locomotrices chez le cheval. *Ann. Méd. Vét.* 2011, 155, 77-82.

O'Hagan B.J. Neuropathic pain in a cat post-amputation. *Aust Vet J.*, 2006, **84**:83–86.

Plavec T., Zdovc I., Juntos P., Svara T., Ambrozic-Avgustin I., Suhadolc-Scholten S. Necrotising fasciitis, a potential threat following conservative treatment of a leucopenic cat: a case report. *Veterinarni Medicina*, 60, 2015 (8): 460–467.

Plummer S.B., Bunch SE, Khoo LHLtous. Tethered spinal cord and an intradural lipoma associated with a meningocele in a Manx-type cat. *Journal of the American Veterinary Medical* (1993). 203(8):1159-61.

Quigley P., Leedale A. Tumors involving bone in the domestic cat: a review of fifty-eight cases. *Vet Pathol.*, 1983, **20**:670–86.

Scott H.W, McLaughlin R. FELINE ORTHOPEDICS. Edition: *Manson publishing*. 2007.chapitre 3: p 136.

Séguin B. Amputations .In: *Veterinary surgery small animal*, 2018, 2nd Ed Spencer A Johnston & Karen M.Tobias ST Louis, Missouri. p1210- 1223

Shulz K.S. Other Diseases of Bones and Joints. In: *Small animal surgery*. 2013.,4th Edition. Fossum TW. ST Louis: Mosby Elsevier; pp. 1391-1410.

St. Jean, G. (1996). Amputation and Prosthesis. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 12(1), 249–261.

Stokosa Jan J. Options des prothèses des membres le manuel MSD (version électronique). (2021).

Valloire-lucot J. La polydactylie chez les mammifères. *Thèse de doctorat vétérinaire (ENVA)*. 2012: p 72, 75, 78-79.

Van Nimwegen S.A., Kirpensteijn J. Specific Disorders Of the skin and subcutaneous tissues; In. *Veterinary Surgery: Small animal*, 2nd Edition, *Johnson S.A & Tobias K. ed, Elsevier* 2018 pp1508-1550

Wu X., Pei B., Pei Y., Wu N., Zhou K., Hao Y., Wang W. Contributions of Limb Joints to Energy Absorption during Landing in Cats. *Applied Bionics and Biomechanics.*, 2019, 1–13.

Webographie:

<https://www.cliniciansbrief.com/article/step-step-forelimb-amputation> consulté le : 05-06-2021.

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Gangr%C3%A8ne> consulté le : 10-07-2021.

<https://www.redohm.fr/2015/12/les-servomoteurs> consulté le : 12-04-2021.

<https://opentextbc.ca/universityphysicsv1openstax/chapter/9-6-center-of-mass> consulté le : 12-04-2021.

<https://neupsykey.com/posture> consulté le : 08-04-2021.