
BIOMECHANIQUE DES QUADRUPÈDES

L'amble

Rachel Senault
Mars 2013



Tous droits réservés pour tous les pays et dans toutes les langues.

Toute reproduction, même partielle par quelque procédé que ce soit, est interdite sans autorisation préalable.

Une copie par Xérogaphie, photographie, support magnétique, électronique ou autres, constitue une contrefaçon passible des peines prévues par la loi du 11 mars 1957 et du 3 juillet 1985 sur la protection des droits d'auteur.

Photographie de couverture : ©francette guittard

Mise en page et graphismes : Ln Cahon

Remerciements

A tous les bipèdes et les quadrupèdes qui de près ou de loin
m'ont soutenue dans cette aventure.
Une attention toute particulière à Florence et à mon père.

Chapitre I : Les équidés ambleurs

I. Les équidés ambleurs

I.1. Introduction

L'amble est l'allure la moins complexe et la plus facile à comprendre. Souvent classée dans les allures rares, artificielles ou défectueuses, l'amble est une allure latérale -ou amblée-, contrairement au trot qui est une allure « diagonale ». Aujourd'hui les sélections génétiques ont favorisé les chevaux à trois allures exclusivement (pas, trot, galop), plus adaptés pour faire la guerre et pour le travail d'équitation. Cependant, quelques races existent encore qui ont gardé leurs allures supplémentaires. Ainsi les ambleurs se retrouvent chez les Paso Fino, l'Islandais, le Mangalarga, le trotteur américain (Saddlebred), le Tennessee, le Rocky Mountain, le cheval mongol, le cheval péruvien, etc.

Dans cette allure marchée à deux temps où les bipèdes latéraux se posent simultanément et successivement, la formule est la suivante : AG-PG ; AD-PD ; AG-PG ; etc. La synchronisation des battues antérieure et postérieure de chaque bipède latéral est parfaite.

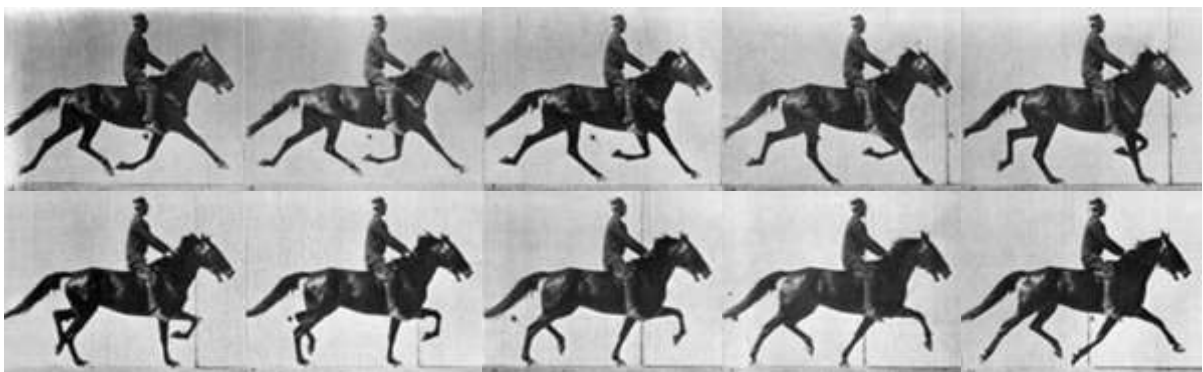


Fig. 19 : Trot à l'amble par bipèdes latéraux - photos[Marey, 1894]

Par contre il ne faut pas la confondre avec le tölt qui est une allure à quatre temps appelée aussi amble à quatre temps. Il s'agit d'une allure sautée où le cheval a toujours au moins un pied au sol. L'Islandais, champion des allures, est le cheval qui représente le plus souvent le tölt. Cette partie sur les chevaux ambleurs a été largement nourrie de ma pratique de thérapeute animalier dans l'élevage d'Islandais de Thierry Depas du château de Bois-Guilbert en Seine Maritime et de thèses vétérinaires de l'Ecole Vétérinaire de Toulouse de Fabienne Nguyen sur les chevaux ambleurs et de Jean-Marc Vignon sur le poney islandais.

I.2. Une allure facile, primitive mais qui peut déranger les idées reçues _____

Le mot "amble" est utilisé à tort pour décrire toutes les allures sortant du schéma de l'équitation classique : pas, trot, galop. En anglais, ces allures qu'englobe le terme d'amble sont appelées "easy gaits". Ce terme qui correspond à une allure confortable, nous pourrions le traduire par le terme générique d'"allures faciles". Ce sont toutes des allures latérales mais qui regroupent en fait plusieurs allures non reconnues comme classiques. D'ailleurs à l'heure de traduire le mot "amble" ou "ambler", les propositions de traduction et leurs définitions sont plus équivoques et fantaisistes les unes que les autres.

A l'état sauvage pourtant il est admis que les chevaux ont quatre allures : le pas, le trot, l'amble et le galop. Le trot et l'amble sont les deux allures intermédiaires pour parcourir de longues distances. Le pas permet de marcher pour se nourrir et le galop de fuir.

Ensuite la domestication a favorisé la sélection en fonction des morphotypes, de certaines aptitudes, des contraintes environnementales (sol, terrain, conditions de vie...). Sous l'influence de ces trois facteurs, les races de chevaux se sont spécialisées jusqu'à favoriser certaines allures plus que d'autres. Aujourd'hui les sélections

génétiques ont tendu vers cette spécialisation cependant jadis les chevaux possédaient communément 4 ou 5 allures¹.

D'ailleurs il est difficile de nier ce que l'on peut observer souvent chez les poulains qui passent à l'amble régulièrement lors des deux premières années de leur vie. Cette marche amblée concerne toutes les races de poulains. Mais, banni par les grands principes de l'équitation, l'amble est encore souvent exclu en Europe occidentale. A propos de l'amble, La Guérinière écrivait: "Dans les allures naturelles, il faut distinguer les allures parfaites: pas, trot et galop; et les allures défectueuses : amble, entrepas ou traquenard et aubin. Les premières viennent purement de la nature sans avoir été perfectionnées par l'Art, et les deuxièmes proviennent d'une nature faible et ruinée." Cette réflexion du créateur de l'Ecole de Cavalerie au début du XVIIIème siècle et qui est l'auteur de la première bible sur l'art équestre, nous éclaire sur ce que les érudits d'équitation considèrent comme référence et en quels termes ils qualifient les exceptions locomotrices.

Allure naturelle chez les camélidés, l'amble résulte parfois pour le cheval d'une disposition héréditaire ou plus souvent d'un dressage spécial. Ainsi la culture arabe favorise l'amble chez les poulains en leur attachant l'antérieur et le postérieur avec une

¹ - Louis Gustave Michel CHAMPION, officier de cavalerie dans son livre *Jeanne d'Arc écuyère*, écrit en 1901 (Nouvelle édition Favre, 1999 ; 243p.) :

« Plus humbles sont les palefrois, les haquenées, les amblans ou ambleurs; mais combien plus utiles ! Nous les appellerons « chevaux de service de l'époque », ceux qui font les routes, les longues étapes, la guerre aussi, quand il le faut. Ils sont employés surtout « afin de chevaucher à l'aise de son corps ». Franchement on leur devait quelque reconnaissance d'épargner la fatigue, alors qu'une dizaine, qu'une vingtaine de lieues même semblaient étape ordinaire aux voyageurs aussi bien qu'aux courriers.

L'offre vient toujours à la demande et l'animal utile se crée suivant les besoins. Le cheval ambleur répondait à une nécessité et cette allure de l'amble qui n'est ni trot ni galop, mais qui souvent donne une vitesse intermédiaire, permettait au cavalier, par la douceur des réactions, d'arriver dispos à son gîte, sans avoir perdu trop de temps sur la route. [...]

Quoi qu'il en soit l'amble paraît avoir été au moyen âge l'allure préférée de tous ceux qui par plaisir ou besoin avaient à parcourir de longues distances. »

corde ainsi le cheval s'habitue à cette allure qui lui permettra de parcourir de longues distances dans le désert en s'économisant. Cette allure latérale est commune chez les chevaux des plateaux péruviens et mongols. L'Islandais qui est le roi des allures peut maîtriser jusqu'à cinq allures avec l'amble et le tölt. Mais nous pouvons aussi trouver des ambleurs en grand nombre aux Etats-Unis (American Saddlebred). Ce cheval de selle correspond alors aux exigences d'allure confortable sélectionnée pour cette qualité. La sélection équine semble actuellement tendre vers la suprématie du cheval de sport ou de compétition, négligeant le cheval de selle. La conséquence de telles recherches se résume en une prédominance de chevaux aux allures diagonales plutôt que latérales alors que les deux existent et caractérisent ensemble la quadrupédie.

I.3. Un peu d'Histoire _____

I.3.1. L'amble et l'iconographie _____

Dans un premier temps nous pouvons affirmer que l'iconographie regorge de représentations de chevaux ambleurs. Sur la tapisserie de Bayeux, sur les fresques étrusques et les chevaux de la Renaissance italienne les chevaux ambleurs sont fréquents. Cependant le caractère esthétique l'a peut-être emporté sur le souci de réalisme de l'époque, pour répondre à des contraintes de perspective ou de superposition. C'est pourquoi leur représentation ne nous permet pas de considérer comme réellement fiable l'existence de cette allure latérale illustrée.



Fig. 20 : Statue équestre de Louis XII à l'entrée du Château de Blois - photo[©Alco]

I.3.2. Des chevaux ambleurs de par le monde _____

Nous ne pouvons nier que la liste d'ambleurs est longue parmi les équidés : "les bidets d'allure" sont des ambleurs notoires (chevaux normands et bretons au pas relevé utilisés autrefois par les marchands de bétail), les "Sangraar" (mules ambleuses d'Abyssinie), le Basuto d'Afrique du Sud, le "Pacer" chinois, le "Campelino" brésilien. Mais comme je l'ai déjà mentionné les Berbères possédaient la majeure partie des races ambleuses. Ensuite l'exportation s'est faite au fil du temps vers les Nouveaux Mondes.

Seuls les chevaux islandais n'auraient pas subi l'influence berbère des croisements de la majorité des chevaux que l'on trouve aujourd'hui sur la planète. L'Islandais serait le survivant d'une lignée viking qui n'aurait connu aucun mélange grâce à la situation insulaire de L'Islande. Aujourd'hui, la répartition majoritaire des chevaux ambleurs a quitté le Maghreb et se trouve installée en Amérique du Sud, aux Etats-Unis, en Afrique du Sud et en Islande.

I.3.3. Une allure de voyageurs et voyageuses _____

Les Anglais nommaient ces ambleurs très utilisés jadis, les « geldings » ou « guilledins ». Ces chevaux pouvaient soutenir leur allure toute une journée avec une vitesse et une aisance propice aux longs voyages. L'amble berce le cavalier d'un mouvement de va-et-vient en raison de ses appuis latéraux alternatifs, rasants et précipités.

Cette allure convenait parfaitement aux cavalières de l'époque qui montaient avec leurs grandes robes. Elles se déplaçaient assises, en travers du cheval, en amazone sur une selle munie d'une planchette, ce qui leur permettait d'appuyer leurs deux pieds.

Ainsi les haquenées, ces juments qui allaient l'amble ou « allaient la haquenée » étaient chevauchées de côté par les femmes aux longues robes. Cette monture de dame ou de voyage était plus confortable et plus économe en énergie pour parcourir de longues distances à vitesse moyenne. Pour dresser à cette allure, les antérieurs et postérieurs étaient attachés pour les obliger à fonctionner en même temps du même côté. Une expression est restée : « Aller sur la haquenée des cordeliers » qui signifie se déplacer à pied un bâton à la main. Autrement dit, en appui latéral sur le pied, et avec la main du même côté.

I.4. Une certaine vitesse _____

La vitesse de l'amble marché atteint en moyenne 9 à 12 km/h. Ensuite peu à peu la prise de vitesse précipite cette allure dissociant chaque bipède latéral. Cette phase est décrite comme l'amble rompu où le postérieur touche le sol plus ou moins en avant de l'endroit où s'est posé l'antérieur du même côté. Cette suite qui fait entendre quatre bruits provoque une période d'instabilité jusqu'à ce que la vitesse augmente et que le cheval tombe à l'amble volant.

A l'amble rapide, les foulées sont alors allongées et se multiplient faisant entendre un couple successif de deux appuis très rapprochés. L'amplitude des foulées a été évaluée chez les ambleurs d'Amérique à plus ou moins 4 mètres. Sa vitesse peut atteindre 50km/h. Cette allure rapide est intermédiaire entre le galop et le trot régulier

mais elle se prête surtout aux terrains secs et à la ligne droite. La neige et les parcours sinueux auraient tendance à handicaper ces chevaux ambleurs.

I.5. Quelques rois ambleurs chez les équins _____

I.5.1. Le Paso Peruano _____

Le Paso Peruano ou cheval de Paso péruvien est l'une des races ambleuses les plus connues et typiques. Ces chevaux sont des purs-sangs qui vont à l'amble dès la naissance. Cette allure héréditaire est maintenue par le croisement de chevaux semblables. Descendant du cheval ibérique, il est impossible d'affirmer si les chevaux arrivés en Amérique présentaient déjà cette tendance ou si elle a été favorisée sur place. En effet la topographie et le climat du Pérou sont particulièrement rudes. Le Paso est un cheval des plus résistants tout à fait adapté aux conditions de vie et au travail à fournir. Il doit parcourir de longues distances sur des sentiers de montagne aux conditions climatiques et d'altitude souvent extrêmes.

Ces chevaux sont adeptes de cette allure latérale à deux temps appelée "ambladura", "huambi" (Equateur), pace (USA) ou "entrepaso". Ils sont souvent croisés avec des mules car cette allure est très recherchée chez les mulets devant sillonner les très étroits sentiers des cordillères.

La morphologie du Paso Peruano est assez ramassée, proche de celle de l'Islandais. L'encolure est forte et musclée, avec un dos court, le garrot est plutôt noyé dans la masse musculaire et mesure autour d'un mètre cinquante. Les reins sont forts et la croupe est tombante ce qui permet le fort engagement des postérieurs. Le thorax est ample et profond.

I.5.2. Le trotteur américain ou « pacer» _____

Parmi les trotteurs américains (aussi appelé American Standardbred), les pacers ou ambleurs pratiquent l'amble de course. Cet amble volant possède le même temps de suspension que celui de l'ambladura du paso Peruano. L'amble, très prisé aux Etats-Unis, est un peu plus rapide que le trot de course. Le plus célèbre ambleur de course,

Nihilator, atteignait 52,8 km/h en course. La morphologie du trotteur-ambleur américain est plus près du sol que le trotteur, d'une hauteur au garrot de 1,52 mètres. Son garrot proéminent est noyé dans les masses musculaires. Le rein est court, large et musclé. La croupe est oblique, le ventre relevé. Les membres possèdent des paturons assez longs.

I.5.3. Le cheval islandais _____

Il est robuste et présente de bonnes proportions qui doivent s'inscrire dans un rectangle. La croupe est bien inclinée, large et musclée. La taille idéale est comprise entre 1,30 mètres et 1,35 mètres. L'amble, son allure de course, doit présenter un temps de suspension net. Elle nécessite une bonne extension des antérieurs, une force et une impulsion visibles, sur un cheval moyennement redressé. L'Islandais pratique l'amble volant, cet amble pur à deux temps voit une synchronisation parfaite des bipèdes latéraux, tel que nous avons décrit l'ambladura ou l'amble de course du Standardbred. Force est de constater que la monte islandaise est particulièrement adaptée à ces allures. Le cavalier est assis très en arrière dans la selle afin de déplacer son centre de gravité et ses jambes sont portées vers l'avant.

Dans une thèse sur l'articulation du jarret, le Dr vétérinaire Alicia Khein met en évidence une prédisposition à l'arthrose du jarret chez les chevaux islandais, race au sein de laquelle l'incidence de l'éparvin est très élevée. Toutefois, cette incidence ne serait pas modifiée par le type et la sévérité du travail, mais par l'âge du cheval. La conformation du jarret du cheval islandais souligne l'importance de l'angle formé par le tarse et son alignement avec la partie distale du postérieur.

I.5.4. Les autres races ambleuses _____

Elles sont nombreuses en Asie : poneys de Mongolie, de Java, les chevaux du Kazakhstan, de Kirghisie, de l'Altaï, du Bashkir... Les chevaux persans, afghans, les turchins amblient aussi mais ils ne sont pas reconnus, ni surtout préservés pour leurs caractéristiques. En Afrique, depuis toujours, les ânes et les mulets montés n'ont de valeur que s'ils amblient.

En Europe, seul l'Islandais est recensé comme ambleur ; le pottok, le poney de Bosnie et le Mysekaya yougoslave présentent quelques dispositions.

I.6. L'amble : Nature ou Culture ? _____

C'est à ce débat fondamental auquel toute recherche est souvent confrontée, que nous renvoie l'étude de cette allure. Parce qu'elle interpelle et même agace tant les gens d'équitation, il semble que cette allure provoque chez les amoureux de ces races équines ambleuses une certaine ferveur à les défendre et à les préserver.

"Les études afin de savoir si le fait d'ambler ou de trotter avait un support génétique ont obtenu des résultats très contradictoires. En général, c'est à l'entraînement que l'on peut discerner si le cheval aura plus de dispositions dans l'une ou l'autre des catégories.[...] De plus l'examen du catalogue résumé des principales races ambleuses permet de conclure qu'il est impossible de définir un type morphologique de cheval ambleur. Aucune corrélation anatomo-physiologique n'a encore pu être démontrée à ce jour." [NGUYEN, 1991].

Les degrés d'angulation de la croupe sont finalement variables. La croupe de l'Islandais est très oblique, alors que celle de l'American Saddlebred est plus horizontale, et pourtant ils amblerent tous les deux. La hauteur au garrot ou la longueur des membres est si variable qu'il serait abusif de vouloir en tirer des conclusions trop rapides.

Cependant, nous pouvons noter que l'engagement des postérieurs dans cette allure doit être facilité par des membres longs (comme chez les camélidés), un angle de jarret plus ouvert (Islandais) ou un ventre relevé (Paso péruvien). Il semblerait que l'équidé ambleur semble faire comme il peut avec ce qu'il a, comme tout un chacun.

Cela dit, il faut relever que l'axe vertébral, présente de façon assez récurrente une musculature développée au niveau du garrot et parfois de l'encolure, ainsi qu'un rein solide. L'idée de rigidification de l'axe vertébral quand le quadrupède passe à l'amble semble donc se préciser. Nous aborderons plus en détail cette biomécanique du rachis lors de l'analyse cinétique de cette allure latérale.

II. Allures, vitesse et confort.

II.1. Rappel sur les allures et leur description _____

II.1.1. Le pas _____

Le pas est l'allure fondamentale dans tous les sens du terme puisque tous les quadrupèdes utilisent cette allure. Au pas, le cheval par exemple, utilise au maximum ses piliers verticaux. Il répartit toujours sa masse alternativement sur deux ou trois membres au sol.

Au pas, les latexions sont majorées pour compenser un défaut d'accompagnement dû au manque de vitesse. Ces latexions sont possibles parce que les apophyses transverses des lombaires ne se touchent pas.

II.1.2. Le trot _____

Le trot est une allure à séquence diagonale. C'est une allure à deux temps où l'on n'entend que deux battues. Au trot, le cheval fait beaucoup de latéro-flexions autour de sa charnière thoraco-lombaire. La répartition des appuis sur un diagonal, oblige alors le cheval à reporter sa masse sur des piliers verticaux controlatéraux (antérieur droit et postérieur gauche ou antérieur G et postérieur D), ce qui engendre une forte contrainte en vrille de l'axe vertébral. Ce point de convergence des forces au niveau de la charnière thoraco-lombaire limite les mouvements verticaux de ressort sur les membres. C'est pourquoi les trotteurs de course sursollicitent cette charnière et utilisent les leviers horizontaux que sont les grandes masses musculaires extrinsèques (fessiers, fémoro-caudaux, quadriceps). Ils gagnent ainsi en puissance de façon assez consommatrice d'énergie musculaire, plutôt que d'utiliser la gravité en restant sur un plan vertical. Les mouvements de translation verticaux vers le haut et le bas mobilisent les muscles intrinsèques de chaque membre dans leur capacité à utiliser la gravité, en emmagasinant et en restituant la force d'attraction terrestre.

Dans la diagonalisation de cette allure, l'engagement d'un postérieur est toujours associé au poser d'un antérieur, ce qui provoque l'élévation maximale de l'encolure. Par

contre le poser d'un postérieur provoque l'abaissement maximal de l'encolure comme un coup de collier. Ainsi la charnière cervico-thoracique semble aussi fortement sollicitée lors de cette allure.

II.1.3. L'amble _____

L'amble est une allure à séquence latérale, PG et AG sont levés et posés simultanément, suivis de PD et AD également posés simultanément. Les piliers verticaux sont mobilisés du même côté permettant une rectitude de la colonne. L'axe vertébral n'est plus le point de croisement de forces mais une structure rigide qui reçoit les mouvements homolatéraux des membres qui fonctionnent comme des ressorts verticaux lors des foulées. Les mouvements de translation verticaux vers le haut et le bas mobilisent les muscles intrinsèques de chaque membre dans leur capacité à utiliser la gravité en emmagasinant et en restituant la force d'attraction terrestre.

A grande vitesse seulement, on peut observer une période de projection comparable à celle du trot. Cette allure sera appelée amble volant. Il s'agit comme le trot d'une allure à deux temps. Dans la réalité, il est possible que le postérieur frappe le sol une fraction de seconde avant l'antérieur du même côté. L'amble est alors dit 'rompu', et devient une allure à quatre temps.

II.1.4. Le galop _____

Le galop est une allure à séquence diagonale.

II.2. Les allures et les piliers du polygone de sustentation _____

L'étude du déplacement du centre de gravité dans cette base de sustentation détermine le degré de stabilité du quadrupède. En effet, sur quatre membres en statique, le cheval est le plus stable mais ne peut pas bouger. Sur trois membres (au pas), la base de sustentation est encore suffisante mais le déplacement ne peut être que lent. Pour gagner en vitesse, le cheval doit passer sur une base de sustentation réduite sur deux membres en diagonale où l'équilibre peut être maintenu malgré tout. Par contre chez le

cheval sur une base latérale, l'équilibre est plus précaire car il ne peut durer sans vitesse. Tout dépend alors du centre de gravité du système et de sa capacité à rester centré entre les quatre piliers.

II.3. Vitesse, rythme et cadence_____

La vitesse détermine le rythme qui permet le temps de suspension des membres entre les deux battues successives. La transition vers l'amble se fera toujours en augmentant la cadence. Par exemple chez les chevaux islandais qui maîtrisent parfaitement quatre allures (pas, trot, amble, galop), ils passent du trot à l'amble de façon logique, car déterminée par l'augmentation de la vitesse. « Quand le pas est allongé et que le cheval augmente de plus en plus ses foulées, le postérieur s'engage en avant de la trace de l'antérieur latéral. Le cheval doit donc lever son antérieur avant que le postérieur ne le rattrape pour éviter que les membres se blessent. L'allure est ainsi toujours à quatre temps mais le décalage entre le lever des paires latérales se raccourcit dans le temps tandis que celui des paires diagonales s'allonge. Ainsi le schéma de séquence s'oriente vers celui de l'amble. Le problème posé par la disparition du soutien diagonal dans la transition vers l'amble est résolu par une augmentation de la vitesse » [NGUYEN, 1991].

L'amble pur est précaire à faible vitesse, puisqu'il balance le centre de gravité d'un latéral sur l'autre. Par contre, la vitesse et le caractère rectiligne de la trajectoire permettent de stabiliser le centre de gravité au niveau du rachis. Ainsi, l'amble ne serait pas adapté aux terrains accidentés ou aux tracés sinueux. C'est pourquoi le cheval finira par trotter ou galoper sur un terrain sinueux ou accidenté. D'ailleurs les chevaux d'endurance sont particulièrement sollicités sur ces deux dernières allures.

II.4. La notion de confort_____

Le trot projette son cavalier à chaque poser d'un diagonal, il n'est donc pas très confortable, ce qui oblige le cavalier à se lever un temps sur deux pour soulager l'impact.

L'amble n'est pas une allure sautée. La projection n'est pas si importante puisqu'elle correspond à un mouvement de balancier d'un côté à l'autre. Il est fréquent que cette allure soit décrite comme un mouvement de roulis sur lequel le cavalier oscille un peu comme dans le pas mais plus rapidement. La vitesse permet le recentrage sur la ligne vertébrale.

« L'amble est une allure marchée ou sautée dans laquelle les bipèdes latéraux gauche et droit restent associés. Ils se posent ensemble sur le sol et se lèvent ensemble, alors que l'autre bipède latéral est à l'appui, pour l'amble marché, ou au contraire quand l'autre bipède latéral est encore au soutien pour l'amble sauté. Les ondulations de la colonne vertébrale sont nulles, l'allure est très confortable pour le cavalier. Les incurvations de la colonne sont à peu près inexistantes, il se produit une sorte de bercement analogue au roulis d'un bateau. » [CHAMBRY, 1990].

Chapitre II : Les camélidés

Un chapitre sur les camélidés va permettre une défocalisation, une prise de recul nécessaire pour traiter vraiment de la biomécanique des quadrupèdes. Mon étude s'appuie sur une richesse de sources et d'expériences, venant d'horizons, de disciplines et de continents différents. Cette aventure repose sur des années de collecte de matériaux, une grande curiosité devant le champ des possibles que propose le monde vivant, le goût pour ce qui fait le quotidien des peuples et pour les rencontres animalières et humaines.

Cette étude a été premièrement nourrie par les recherches du CIRAD et les nombreux récits de voyage du Docteur vétérinaire Bernard Faye, spécialiste des camélidés en France. Ma rencontre avec cet humaniste animé par le monde animal m'a fait prendre conscience que le monde vétérinaire n'avait pas beaucoup étudié la biomécanique des quadrupèdes autres qu'équins et un peu canins. C'est ainsi que je lui proposai en début d'année 2012 de m'avancer sur ce chemin de l'amble et des camélidés sans trop savoir où cela nous mènerait.

Mes séjours répétés en Amérique du Sud pour y étudier les civilisations précolombiennes et l'héritage culturel transmis aujourd'hui aux peuples indigènes latino-américains, m'ont permis de recueillir beaucoup de matériaux de recherche pour examiner le schéma locomoteur des lamas, alpagas et vigognes des plateaux andins.

Au début de mes études d'étiopathie animale en 2009, ma rencontre avec des éleveurs de dromadaires en France, comme Cécile Le Meur de l'association Dromasud (jockey et éleveuse de dromadaire dans l'Hérault) m'a permis de mettre en pratique mes connaissances d'anatomie comparée des quadrupèdes, en palpant, testant et manipulant ses dromadaires bien patients.

Ma participation en août 2012 à la première course de dromadaire en France dans la Sarthe, en tant qu'ostéopathe stagiaire de l'écurie de 10 dromadaires pendant la durée des entraînements et la course, a été un sublime terrain d'observation pour mes recherches. J'ai pu y rencontrer l'éleveur et organisateur de la course Olivier Philiponneau, l'entraîneur syrien Rabia Allali et Mohamed Benabdemula, cavalier, soigneur et éleveur tunisien sans nommer tous les jockeys spécialisés dans la monte des

dromadaires et/ou des chevaux d'équitation. Généreux en remarques et conseils, ils ont répondu à mes interviews tout en considérant de façon attentive mes apports d'analyse cinétique et biomécanique. Le matériel collecté à base de photographies, de films, d'observations biomécaniques tant visuelles que palpatoires des dromadaires lors de la semaine d'entraînement, a constitué le ciment fondateur de la construction de mes recherches basées sur mes connaissances anatomo-physiologiques. Pouvoir recueillir le ressenti de ces cavaliers, tous experts en équitation, m'a permis d'étoffer cette analyse de l'amble et de la quadrupédie.

Enfin la thèse vétérinaire de Barbara Blanc [2012] m'a donné un cadre de travail pour aborder cette étude des camélidés. Ses recherches et ses expériences menées sur la locomotion de la girafe et l'étude cinétique de la répartition de pressions sur le pied ont orienté mon travail de vulgarisation mené sur le quadrupède ambleur. [ANNEXE 3, Taxinomie des artiodactyles]



Fig. 21 : Dromadaire en course à l'amble (Sarthe, Août 2012) - photo [R.Senault]

L'objectif est de décrire l'amble par la cinématique en réalisant une étude en dynamique. La finalité étant de caractériser les mouvements mis en jeu lors de la locomotion sans s'éterniser sur les forces à l'origine de ces mouvements.

Il serait aussi possible de définir les vitesses et accélérations linéaires et angulaires ainsi que les angles articulaires en fonction des temps de l'allure. Mais tout ce travail veut intégrer le cadre du diagnostic biomécanique qui se résume à objectiver et décrire l'allure pour pouvoir éventuellement déceler des anomalies et notamment des boiteries. Avant tout, il faut noter qu'il serait vain et ennuyeux de reprendre l'intégralité de l'anatomie du dromadaire, du lama ou de la girafe. Pour cela il faudrait considérer qu'il existe une ou des structures particulièrement adaptées à cette fonction locomotrice, ce qui semble loin d'être confirmé par les études en anatomie comparée menées sur les systèmes locomoteurs de chacun de ces quadrupèdes. Dans le premier chapitre sur les chevaux ambleurs, cette hypothèse avait aussi été écartée. Seuls quelques points anatomiques pertinents seront mentionnés pour une compréhension simplifiée des schémas locomoteurs des ambleurs. Un volet sur le pied et son fonctionnement très adapté à son terrain et ses contraintes sera développé à la fin de cette étude.

I. Particularités anatomiques des camélidés (chameau, dromadaire, lama, vigogne) et de la girafe

I.1. Le système ostéo-articulaire



Fig. 22 : Squelette de dromadaire en 1er plan et de lama en 2è plan - photo

I.1.1. Des métapodes très longs _____

Selon les espèces il y a une dissymétrie plus ou moins marquée de longueurs des antérieurs et des postérieurs à l'origine de l'inclinaison du rachis.

Les fûts diaphysaires sont très droits (plus que chez les autres espèces herbivores), ce qui décharge les membres des pressions qui s'exercent sur les articulations. D'ailleurs les fûts fémoraux et métacarpiens sont aussi très importants.



Fig. 23 : Chameau de Sibérie - photo [R. Senault]

I.1.2. Articulations de la partie distale des membres _____

Les quatre membres ont des articulations variées qui servent d'amortisseurs aux réactions des allures, ainsi que de points de jonction des leviers pour assurer la propulsion. Les articulations des onglons jusqu'au boulet sont communes aux quatre membres. Mais au dessus, à la partie proximale des membres, les différences sont capitales, parce que leurs angles articulaires sont inversés, en opposition systématique, ceci confirme bien leurs rôles principaux de moteur-arrière ou d'amortisseur-avant.

Les trois articulations du pied (P1, P2, P3) avec les métacarpes ou métatarses fonctionnent toujours de façon synchrone chacune d'elle à sa manière, l'une se mettant

en sous-fonctionnement pendant qu'une autre sur-fonctionne selon les phases de la foulée (un peu comme le cheval [ANNEXE 7]) :

- Les trois articulations fléchissent en même temps après le lever, flexion pendant la phase de raccourcissement du membre.
- Les trois articulations s'étendent à la fin de la phase d'extension avant de poser.
- Mais après le poser, pendant la phase d'amortissement, il y a extension forcée du boulet, en même temps qu'une flexion du paturon et du pied.
- Pendant la poussée, les trois articulations se redressent successivement, en commençant par celle du boulet pour finir par celle du pied.

Le boulet ou articulation métacarpo-phalangienne est une articulation très sollicitée lors du déplacement. C'est pourquoi elle est renforcée chez les camélidés au niveau des scutum moyens.

I.1.3. Le rachis des camélidés _____

I.1.3.1. Le rachis cervical très flexible _____

La croissance des sept cervicales et des métapodes (métacarpe et métatarse) est particulièrement développée chez cette famille. Cette caractéristique impose des contraintes mécaniques importantes en termes de gravité et de poids du corps.

Une étude de l'allométrie du squelette axial de la girafe révèle que la croissance des vertèbres C2 à C7 se déroule après la naissance et qu'il existe une croissance différentielle des processus épineux et des corps vertébraux. [BLANC, 2012]



Fig. 24 : Photo montage de l'encolure d'un dromadaire sur les mouvements de flexion et d'extension. [CIRAD]

I.1.3.2. La charnière cervico-thoracique et le rachis thoracique _____

En général, les processus épineux des 3 premières vertèbres thoraciques fonctionnent comme des bras de levier pour transmettre la force aux corps vertébraux. Les corps vertébraux sont plus larges que longs et leur allométrie est supérieure à celle des autres vertèbres caudales.

Plus le cou est allongé, plus la tête est lourde, et plus les apophyses épineuses du garrot sont longues pour l'insertion du ligament nucal qui s'insère sur la crête occipitale et qui envoie une lame sur tous les processus épineux des vertèbres cervicales jusqu'au début du garrot. Ce puissant ligament jaune aux propriétés élastiques joue un rôle de stabilisation et de soutien de la tête et de l'encolure. D'ailleurs la charnière cervico-thoracique des camélidés se situe plutôt en T1-T2 qu'en C7-T1. Elle aurait reculé son point d'ancrage pour supporter plus de poids. [ANNEXE 2]

Cependant, pour alléger la tête, leur crâne est proportionnellement aux autres herbivores, assez petit et constitué d'os spongieux pneumatisé avec des sinus très développés contrairement aux autres ruminants (surtout caractéristiques de la girafe).

I.2. Particularités myologiques _____

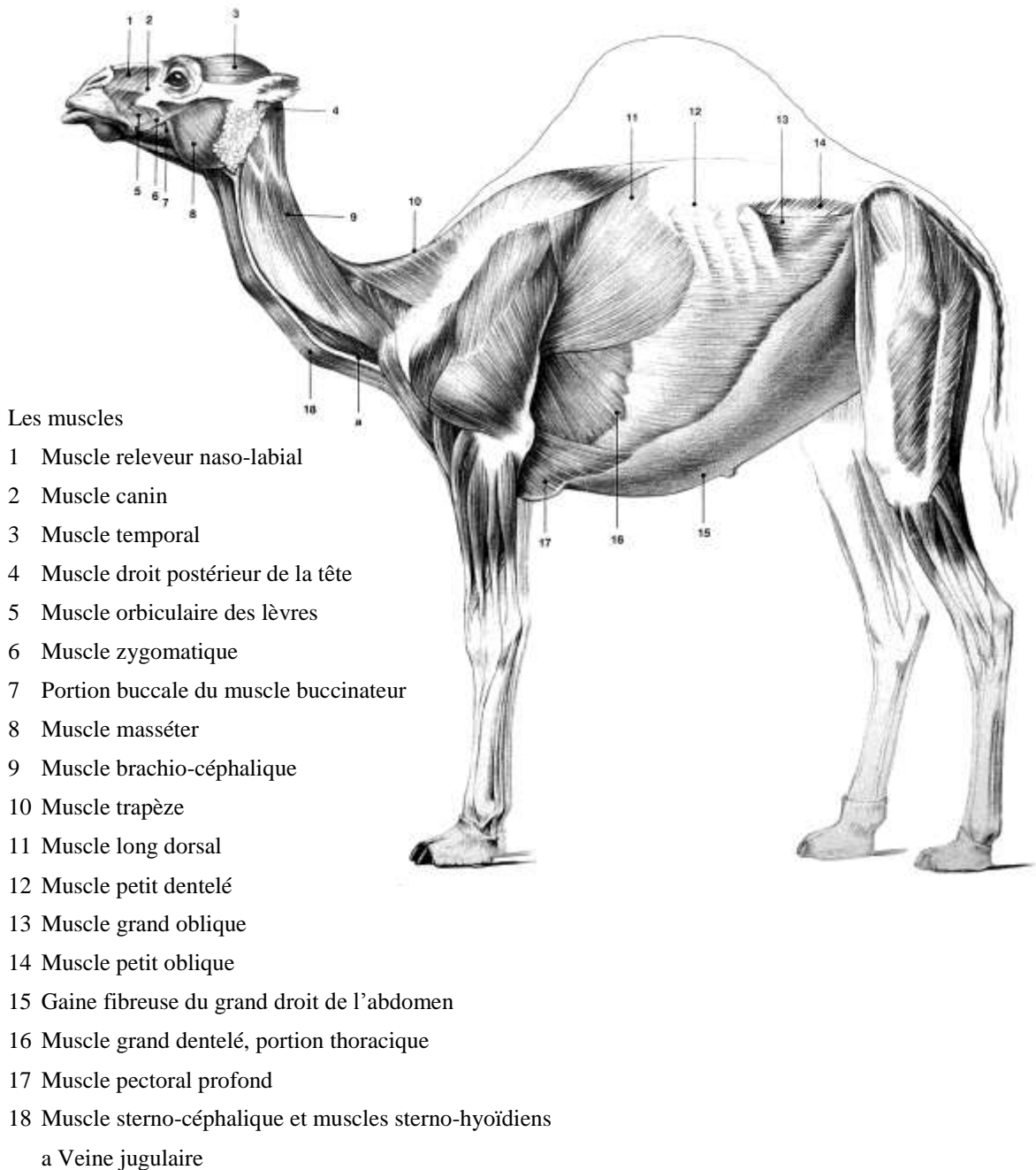


Fig.25 : Myologie du dromadaire - dessin [Szunyoghy, 1996]

Le triceps brachial du membre thoracique, extenseur de l'avant-bras présente une structure particulière. Il possède un chef long, un chef médial et un chef latéral. Cependant il présente une expansion du chef long non décrite chez les équidés et les ruminants domestiques. L'expansion du chef long vers l'extenseur dorsal des doigts facilite ainsi l'hyper-extension du membre antérieur lors de l'embrassée, prolongeant ainsi la phase de soutien et couvrant ainsi plus de terrain.

Il aurait été intéressant de disséquer des muscles de camélidés pour étudier une éventuelle correspondance entre la structure de leurs fibres et leur performance physiologique et fonctionnelle dans des conditions hostiles, impliquant l'économie de mouvements et d'énergie. A ce sujet, la longueur des fibres des muscles striés serait caractéristique des coureurs kényans qui sont les plus performants du monde. Les fibres d'actine myosine de ces athlètes sont allongées au niveau des muscles gastrocnémiens. Cependant, le chercheur biomécanicien israélien Dario G. Liebermann m'ayant entretenue sur ce point, réfute l'idée que cette particularité soit génétique. Il a étudié de grands sportifs de tous les continents et il affirme que l'entraînement développe et facilite l'allongement des fibres musculaires et les différenciations physiologiques pour s'adapter à des contraintes de performance. De plus, aucune étude anatomique n'a été menée à ce sujet sur les espèces animales ambleuses. Ainsi aucune conclusion hâtive ne peut être retenue concernant une particularité de structure myologique spécialisée chez les ambleurs camélidés.

I.3. Particularités vasculaires _____

Le milieu désertique offre des conditions de températures hostiles pour le système vasculaire soumis à de fortes amplitudes thermiques entre la nuit et le jour. C'est pourquoi son système veineux est une performance physiologique qui lui permet lors de ses déplacements un bon retour veineux.

Tout d'abord la peau épaisse et tendue des camélidés (surtout le dromadaire) et de la girafe, augmente l'effet de contention et assure un bon retour veineux.

De nombreux mécanismes compensateurs permettent de maintenir une pression sanguine systémique stable, quelque soit la position de l'animal, grâce à la présence de valvules, d'anastomoses entre les différents vaisseaux. La structure vasculaire particulière des membres, malgré une longueur importante des vaisseaux, ne souffre

quasiment jamais d'œdèmes. Cependant le maintien d'une pression artérielle forte ne suffirait pas à vaincre la pesanteur sur une telle distance. C'est surtout associé au retour veineux assuré par la contraction des muscles lisses permettant un péristaltisme de base, que le rôle de pompage est favorisé. La structure musculaire de la paroi des vaisseaux limite aussi la dilatation et l'extravasation sanguine par une activité contractile. De plus la présence de valvules intraluminales dans les veines métacarpiennes fortement développées se situant entre l'os du canon et le muscle interosseux, renforce cet effet de clapet anti-retour.

Sa caractéristique artiodactyle fait que la partie distale du pied présente un double réseau de vaisseaux, ce qui réduit le diamètre de chacun à la différence des chevaux. Cela permet peut-être de renforcer l'action anti-retour des valvules.

Enfin pour éviter la dilation des veines avec la chaleur, le dromadaire possède un système urinaire externe en rétroversion, c'est-à-dire tourné vers l'arrière, ce qui lui permet d'arroser ses membres postérieurs et de les rafraîchir à chaque miction.

I.4. Particularités neurologiques _____

Il semblerait que le nerf médian des camélidés innerve à la fois la face dorsale et palmaire du membre antérieur. Ce nerf chez les équidés n'innerve que des muscles fléchisseurs (le perforant, le perforé et le suspenseur du boulet) qui sont des systèmes musculo-tendineux qui se trouvent sur la face palmaire des antérieurs. L'innervation de la face dorsale des membres caractérise plutôt l'extension des antérieurs. Un lien structure-fonction reste à explorer. [ANNEXE 4]

D'autre part, l'hypothèse d'une allure cadencée et rythmique, favorisée par les Central Pattern Generator (CPG) resterait à étudier. Le système nerveux des ambleurs utilise-t-il cette capacité locomotrice pour les longs voyages endurants sur des lignes droites ?

En effet l'étude décrite par le Professeur de Médecine Montoya sur un chat thalamique (cité en première partie) révèle les capacités du système locomoteur à s'automatiser une fois le démarrage de la cadence enclenché. Cette expérience suppose une mise en route préalable et reposerait sur l'existence d'une vitesse minimale (utilisant la gravité et l'énergie cinétique) et d'un rythme en alternance sur une ligne droite.

II. Biomécanique de l'amble

Il est nécessaire de reprendre simplement mais de façon précise tout de même les structures en action lors des foulées à l'amble. Le travail de flexion et d'extension fortes des membres lors de la mise en œuvre de cette allure, nous amène à reconsidérer toutes les articulations et les grands jeux musculaires utilisés dans l'amble. Même si les phases de chaque membre dans la foulée sont les mêmes que pour les autres allures, le caractère très amplifié permis par la grande laxité et l'exploitation au maximum des amplitudes des mouvements majeurs de ces articulations, justifient de nous arrêter sur cet exposé anatomique plus poussé. Les planches d'anatomie détaillées et les tableaux de myologie sont fournis en annexe. [ANNEXE 4, tableau myologie et innervation des camélidés].

Il faut aussi considérer que les proportions des différentes parties du corps et la répartition de masse du camélidé vont déterminer l'équilibre en statique et en dynamique. [ANNEXE 5, anatomie du dromadaire]

Rappelons tout d'abord succinctement les principes fondamentaux de la cinétique qui reposent sur l'emménagement de l'énergie potentielle et la restitution de l'énergie cinétique. Cet équilibre dynamique énergétique se met en place à chaque foulée.

L'amortissement ou phase d'emménagement de l'énergie potentielle :

La gravité est essentielle dans cette phase qui permet aux structures d'économiser de l'énergie en se servant de la masse de l'animal pour emmagasiner de l'énergie potentielle sans solliciter de muscles énergivores mais en jouant sur les structures tendinologementaires.

Les trois articulations du pied-paturon-boulet fonctionnent économiquement comme des trampolines qui amortissent au début de l'appui, puis font rebondir pendant la poussée : le tendon et le ligament suspenseur du boulet s'allongent en emmagasinant l'énergie potentielle du choc, puis ils se rétractent en restituant cette énergie pour élever le boulet et le projeter en avant à la fin de la détente, grâce aux contractions musculaires qui commandent les différents segments du membre, exactement comme le fait le gymnaste sur son trampoline pour entretenir ou augmenter ses rebondissements.

L'impulsion (terme d'équitation) ou précontrainte :

L'impulsion désigne l'ensemble des forces nécessaires à la propulsion. Elle est mesurée par le degré de tension neuro-musculaire mis en œuvre pour créer le mouvement. Elle repose sur l'équilibre des agonistes en action et de l'anticipation des antagonistes qui interviennent pour modifier ou renverser l'équilibre musculaire en cours.

La propulsion :

La propulsion comprend le mécanisme propulsif des postérieurs, le mécanisme propulsif des antérieurs (la traction), le mécanisme propulsif du tronc-encolure. Le muscle propulsif agit à la fois par ouverture des angles articulaires et par oscillation des segments osseux. Son action varie suivant l'instant considéré : le soutien (l'enjambée des membres) ou l'appui. Il est conditionné par l'intervention de muscles antagonistes qui détermine tel mouvement.

II.1. Rappels anatomiques et biomécanique de l'antérieur _____

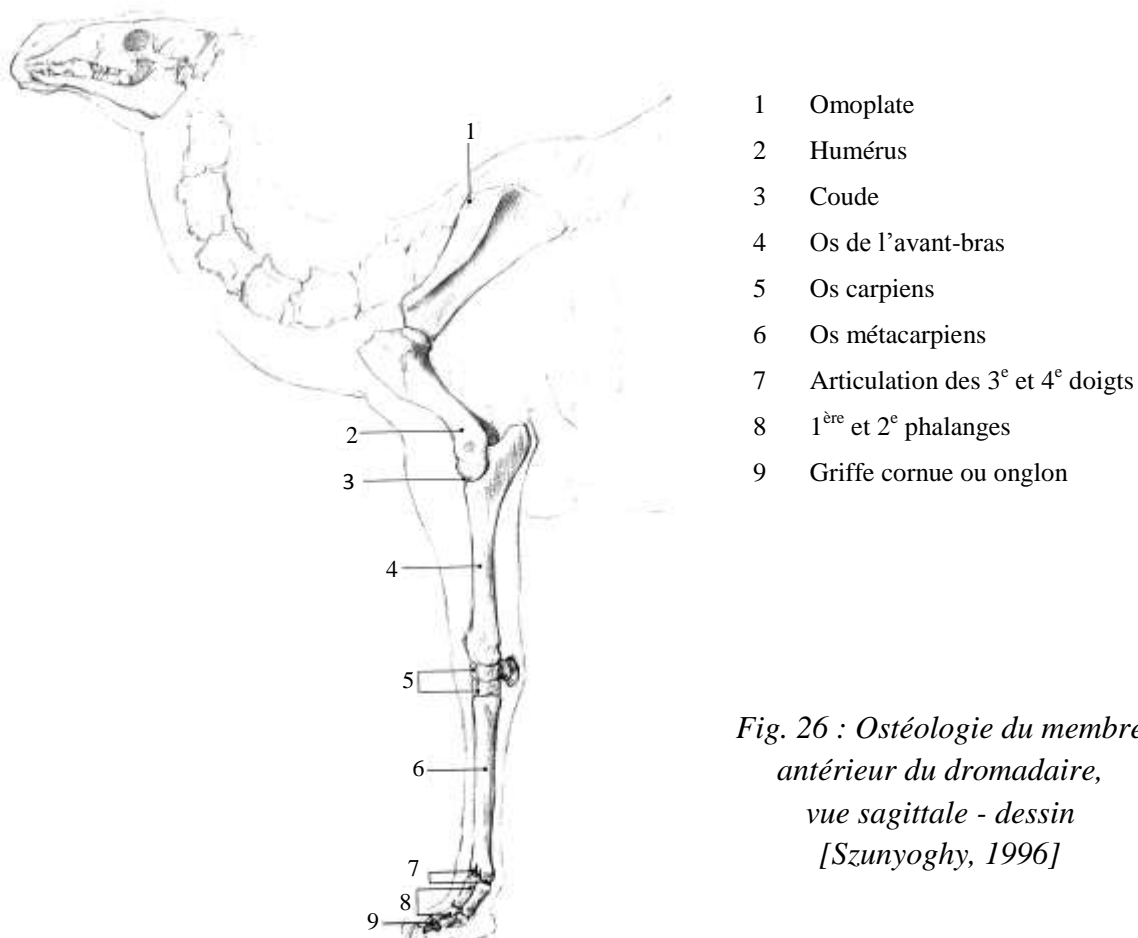


Fig. 26 : Ostéologie du membre antérieur du dromadaire, vue sagittale - dessin [Szunyoghy, 1996]

II.1.1. La sysarconse scapulo-thoracique _____

Le soutien du tonneau représenté par la cage thoracique suspendue entre les deux membres antérieurs est comme l'image d'un berceau en suspension entre les deux omoplates. Les muscles pectoraux (subclavier, ascendant, descendant, transverse) sont des cordages qui s'opposent à tout écartement des piliers antérieurs de la voûte (bloc garrot encastré entre les cartilages de prolongement scapulaire). [ANNEXE 2]

La sysarconse scapulo-thoracique n'est pas une articulation concernant deux segments osseux cependant l'omoplate est fixée par contention de muscles et de fascias pour lui permettre de glisser sur le grill thoracique.

II.1.2. Fonction de la scapulo-humérale _____

Afin de comprendre le fonctionnement du membre suspendu à l'articulation scapulo-humérale, il est nécessaire de faire un rappel sur les notions de protraction et de rétraction.

Les muscles de la protraction ou antépulsion, puissants et étendus couvrent les côtes. En tirant l'antérieur vers l'avant, ils permettent l'avancée du corps du quadrupède vers l'avant : muscles omo-transversaire, brachio-céphalique, pectoral descendant et trapèze thoracique et dentelé ventral.

La rétraction ou rétropulsion permet d'envoyer le membre vers l'arrière grâce aux muscles rhomboïde, trapèze cervical, dentelé du cou et subclavier qui s'insèrent sur la scapula et les muscles grand dorsal et pectoral ascendant qui s'insèrent sur l'humérus.

L'articulation de l'épaule :

Le trapèze thoracique est synergique avec le rhomboïde dans l'élévation de la scapula. Au soutien cette action permet de maintenir le membre au dessus du sol. Le dentelé ventral du thorax solidarise l'omoplate au tonneau. [ANNEXE 2]

La flexion scapulo-humérale implique la fermeture de l'angle caudal de l'articulation par le relèvement de l'humérus mais surtout par pivotement de la scapula vers l'arrière. Sa flexion maximale est limitée par la tension du biceps.

L'extension scapulo-humérale ouvre l'angle caudal de l'articulation qui sera limitée par la tension des anconés et par la butée du bord antérieur de la cavité glénoïde de la scapula dans la fossette articulaire de l'humérus.

II. 1.3. Le coude _____

Cette articulation à ressort permet des mouvements de flexion et extension qui s'effectuent sous une forte tension des ligaments collatéraux (latéral, médial). La capsule articulaire est renforcée crânialement et des muscles (tendon du biceps et du brachial médialement, triceps et anconés caudalement, fléchisseurs et extenseurs) contribuent au maintien des pièces osseuses du coude.

II.1.4. Le carpe ou genou _____

Pour amortir les chocs à l'appui, les os carpiens glissent légèrement les uns sur les autres. Les cartilages articulaires revêtent les faces de contact de ces os et concourent par leur élasticité à l'amortissement. La face crâniale présente des cals tégumentaires pour permettre la réception du poids antérieur quand le camélidé se baraque (position couchée sur ses antérieurs pliés).

Lors de la flexion, le ligament dorsal est fortement tendu. Les deux rangées carpiennes s'écartent l'une de l'autre. Dans cette flexion majorée quand l'animal est couché, le canon et l'avant-bras se touchent. La proéminence du condyle interne du radius presse la partie correspondante du carpe vers l'extérieur, provoquant une abduction de l'extrémité distale du membre.

Dans l'extension complète, le canon est souvent au-delà du prolongement de l'avant-bras. Le ligament palmaire s'oppose cependant à une extension plus marquée.

II.1.5. Articulation du boulet _____

L'articulation métacarpo-phalangienne contribue fortement à l'effet amortisseur et propulseur du membre.

La flexion métacarpo-phalangienne est limitée par la tension des extenseurs des doigts.

L'extension est limitée par la tension du ligament suspenseur du boulet et des tendons fléchisseurs.

II.1.6. Articulation des doigts _____

L'articulation des phalanges permet surtout la flexion et l'extension. L'extension cesse lorsque P3 et P2 sont en ligne. L'articulation est alors bandée par les ligaments collatéraux et par les ligaments sésamoïdiens distaux. Ces derniers fonctionnent comme le ligament suspenseur du boulet pour la première phalange. Ainsi, pendant l'appui du membre, P1 et P2 forment un levier rigide qui oscille sur P3. Il faut noter l'importance du ligament inter-sésamoïdiens qui solidarise les deux onglons et permet l'adaptation au terrain tout en limitant l'écartement des deux doigts.

L'articulation du pied a une flexion limitée par le tendon de l'extenseur dorsal. L'extension est limitée par la tension du fléchisseur profond qui presse sur le petit sésamoïde.

II.2. Les interventions musculaires et articulaires du membre antérieur lors des différentes phases d'une foulée _____

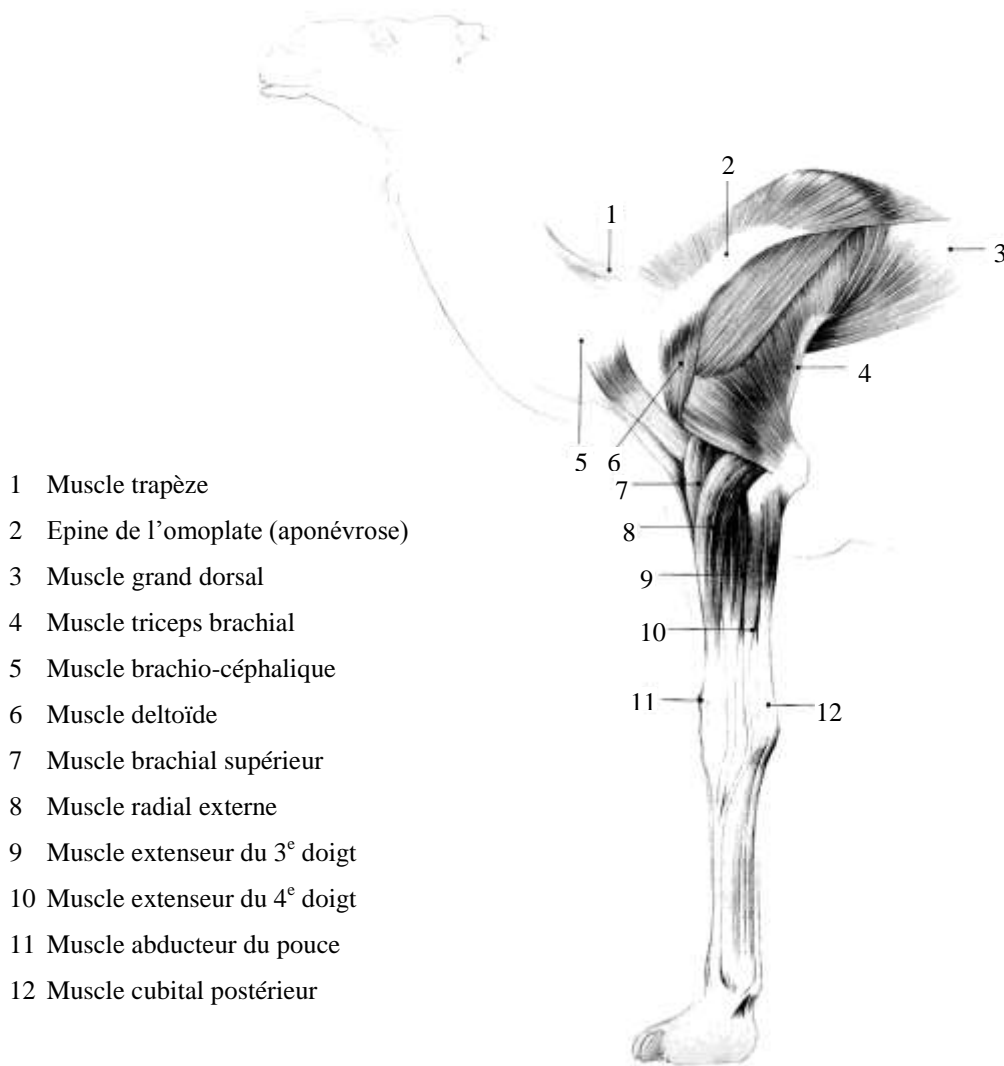


Fig. 27 : Myologie du membre antérieur du dromadaire, vue sagittale - dessin [Szunyoghy, 1996]

II.2.1. Rappel : le *stay apparatus* en statique, le soutien et l'appui _____

Le *stay apparatus* comme le nomme les anglais, caractérise le membre antérieur car il fait l'économie de travail musculaire en sollicitant tout un jeu de structures tendino-ostéo-articulaires. Tel un jeu de haubans tendus efficacement sur le mât que représente le pilier antérieur, ce système presque tensegrité est une performance biomécanique harmonieuse qui permet le maintien du membre en statique le plus économiquement possible.

Trois phases au soutien : le membre se balance vers l'avant effectuant un mouvement de balancier.

Trois phases à l'appui : le membre bascule en avant au dessus de son pied. Il subit un déplacement relatif vers l'arrière.

Les groupes musculaires concernés sont :

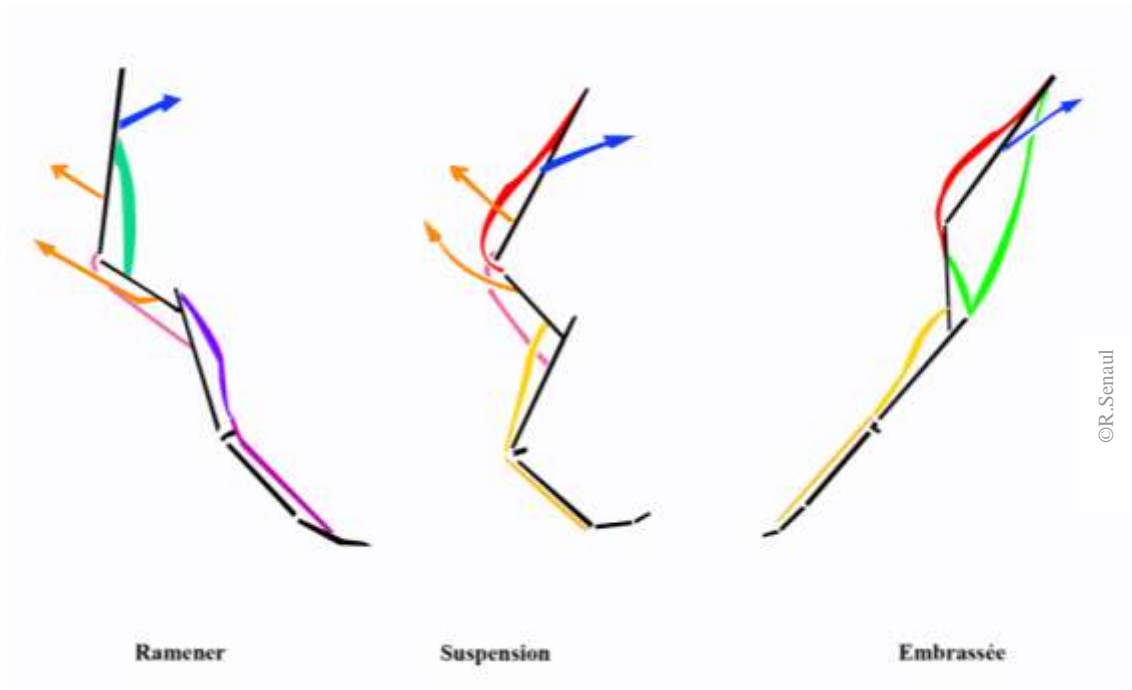
- Les muscles du tonneau (soutiennent et solidarisent le membre au tronc) et « hors tonneau » (muscles du tronc et de l'encolure). Ces derniers, très puissants, ont un rôle important dans la locomotion : embrassée et propulsion.

- Les muscles de l'épaule, du bras et de l'avant-bras.

Il convient de toujours analyser chaque phase en fonction de celle qui la précède mais aussi de la suivante. Cela s'explique entre autres par le fait qu'un muscle peut avoir plusieurs fonctions selon la phase considérée. La phase n'est pas un temps mais un moment qui dure. La représentation statique fixe une image mais il faut garder à l'esprit que ce sont des représentations d'un mouvement en trois dimensions.

II.2.2. Le membre antérieur au soutien _____

La scapula sert de point fixe. Le membre se balance autour de la scapula décrivant trois phases.



- m. deltoïde
- m. omotransversaire et brachiocéphalique
- m. biceps
- m. supra épineux
- m. triceps brachial
- m. extenseurs
- m. fléchisseurs

Fig. 28 : Schéma du membre antérieur au soutien [R. Senault, 2013]

II.2.2.1. Le ramener

Signification : orientation du membre en rotation sagittale antérieure.

Il commence au moment où celui-ci quitte le sol, après la propulsion. Toutes les articulations entament une flexion. Celle-ci s'opère par une contraction concentrique des muscles. La diminution de longueur du membre est progressive et s'opère de bas en haut.

II.2.2.2. La suspension _____

Elle correspond au passage à la verticale du membre. C'est la position neutre où le membre est fléchi dans le vide. Le coude continue son mouvement de flexion jusqu'à ce que les autres articulations du membre aient atteint leur flexion maximale. C'est le moment « neutre » avant d'amorcer la phase suivante.

II.2.2.3. L'embrassée _____

Signification : orientation du membre en rotation sagittale postérieure.

Elle est caractérisée par l'obliquité maximale de la scapula qui signifie que le membre a fini son ample mouvement de balancier vers l'avant. Ainsi, l'étendue de la foulée est liée à l'ouverture des angles articulaires dans une extension qui embrasse le plus de terrain. Tel un appareil réciproque, l'extension de l'épaule et du coude provoque celle des articulations distales grâce à la contraction concentrique des muscles de l'embrassée.

La préparation du poser coïncide avec l'allongement maximum de l'antérieur.

II.2.2.4. Actions musculaires au soutien _____

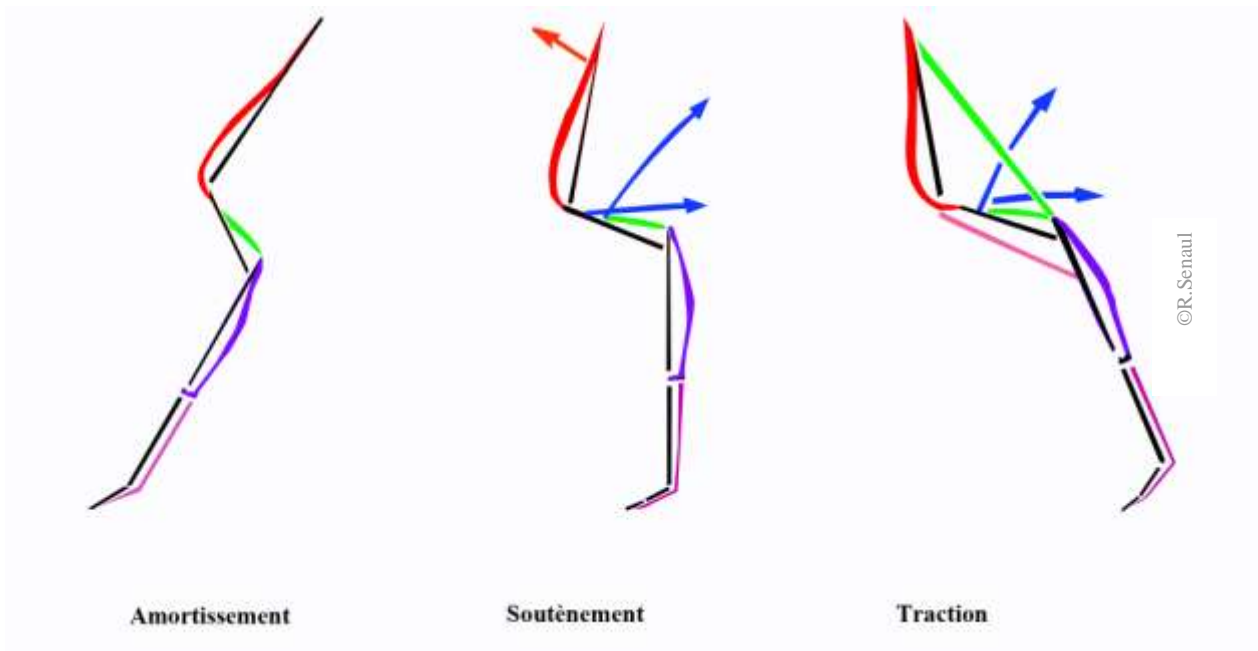
Le raccourcissement au soutien s'opère d'abord par la contraction des fléchisseurs du rayon digité. L'ulnaire latéral, le fléchisseur ulnaire du carpe et le fléchisseur radial du carpe fléchissent ensuite le métacarpe. Le biceps et le brachial fléchissent l'avant-bras.

La contraction du dentelé ventral du thorax et du trapèze thoracique attirent la scapula vers l'arrière et ferme l'angle de l'épaule. Cette fermeture retentit sur le coude qui se ferme passivement sous l'action du biceps et de sa corde. L'allongement se produit par l'action des extenseurs des phalanges et du métacarpe qui rectifient le rayon digité et l'axe avant-bras-canon. Le triceps et l'anconé étendent le coude et l'affermissent jusqu'au moment du poser. Le brachio-céphalique dont l'action constante pendant le soutien amène d'abord la pointe de l'épaule vers le haut et, en avant, agit ensuite sur l'humérus et le redresse en portant l'angle du coude en avant. Les muscles

supra et infra-épineux étendent l'humérus. Le dentelé ventral du thorax continue de faire pivoter la scapula vers l'arrière et d'élever son extrémité inférieure.

II.2.3. Le membre antérieur à l'appui _____

Le pied sert de point fixe et le membre pivote autour. Le poser du membre au sol (ou amortissement) est suivi par une position neutre verticale où le sabot est aligné avec la scapula (ou soutènement). Et enfin, pendant la phase de propulsion, le membre se trouve en rotation sagittale vers l'avant (ou détente).



- m. biceps
- m. supra épineux
- m. grand dorsal et m. pectoral ascendant
- m. triceps brachial
- m. fléchisseurs

Fig. 29 : Schéma du membre antérieur à l'appui [R. Senault, 2013]

II.2.3.1. L'amortissement

L'amortissement démarre à la battue. Elle est caractérisée par la fermeture contrôlée des angles articulaires qui permettent d'absorber les réactions entre le sol et l'énergie cinétique de la masse du quadrupède. L'orientation des pièces osseuses est toujours la même que dans la phase précédente, le pied posant en talon. Cependant, la contraction musculaire change de par cette nouvelle sollicitation. Ces contractions contradictoires démontrent que les activités dynamiques opposées sont indissociables lors de toute mise en mouvement. L'activité des muscles lors de l'amortissement est la contraction excentrique. Celle-ci permet d'éviter la flexion des articulations lors de la prise de contact du membre au sol.

L'antérieur se pose en extension plus ou moins forte en fonction de l'étendue de l'enjambée et la vitesse de l'allure. Les articulations méta-PI s'étendent au maximum. Les boulets s'étendent en premier, il entraîne l'affaissement du rayon digité qui pivote autour du pied. Ce mouvement entraîne le redressement du rayon radio-métacarpien et l'abaissement du genou. Cette fermeture crâniale du boulet se fait sentir sur l'articulation du coude, et si le garrot descend, c'est bien plus par la flexion de l'épaule.

La plupart des muscles propulsifs opèrent un travail de résistance pendant l'amortissement. Les tendons suspenseurs du boulet agissent de la même façon. Les brides -radiale et carpienne- suppriment toute intervention musculaire. Les extenseurs du doigt, avec la contention des fléchisseurs, maintiennent le carpe et empêchent l'extension dorsale.

II.2.3.2. Le soutènement

Le soutènement représente le passage du membre à la verticale à l'appui.

Il marque une phase neutre, une transition, moment où certaines actions musculaires rentrent en jeu et d'autres s'annulent. L'orientation des rayons du membre vers l'arrière s'achève pour entamer une bascule vers l'avant.

Les muscles de la phase précédente prolongent leur activité excentrique. Ils évitent ainsi l'effondrement de la colonne osseuse du membre sous le poids de l'animal. Les fléchisseurs soutiennent particulièrement l'articulation du boulet. La rétraction du

membre se poursuit par la participation d'autres muscles qui tirent la scapula et l'humérus vers l'arrière et amorcent la propulsion. Cette phase de rotation s'opère déjà au cours de la phase précédente par le redressement du rayon radio-métacarpien qui fait avancer le coude. Ce rayon pivote autour du boulet qui reste immobile. De même, la flexion du coude par obliquité de l'humérus, porte la pointe de l'épaule en avant. La rotation se poursuit par le redressement du rayon phalangien qui bascule sur l'onglon. Le boulet s'élève et s'ouvre, le rayon radio-métacarpien tourne sur lui. La scapula bascule en avant sur l'humérus, en agrandissant l'angle de l'épaule.

Les anconés freinent la bascule de l'humérus vers l'avant. Le biceps fixé au radius maintient en avant l'articulation de l'épaule et s'oppose à son fléchissement. Les muscles sus et sous épineux et le subscapulaire interviennent dans le même sens. Le pectoral ascendant et le grand dorsal retiennent l'humérus et évitent une trop grande bascule de cet os vers l'avant.

II.2.3.3. La propulsion ou phase de traction _____

C'est la dernière phase de la foulée qui se caractérise par la rétraction, le redressement du membre, c'est-à-dire son appui et sa bascule globale vers l'avant. Elle se conjugue avec l'ouverture de toutes les articulations par des extensions s'accompagnant de nouvelles contractions concentriques. Le pectoral ascendant intensifie son action en redressant l'omoplate sur l'humérus favorisant ainsi la détente du membre. Le subclavier agit en synergie avec le pectoral ascendant lors de la détente en tractant l'épaule vers l'arrière. Le grand dorsal, tout en tractant le bras vers l'arrière, tire maintenant le tronc vers l'avant pour compléter son action propulsive.

Au niveau de l'épaule et du coude, le biceps brachial est synergique avec le triceps puisqu'il coordonne les mouvements de l'épaule et du coude lors de la locomotion. De plus, à l'appui, il maintient l'angle de l'épaule avec le pectoral ascendant, le subclavier et le sus-épineux. Il participe ainsi à l'extension de l'épaule. Cette contention s'exerce dès la phase précédente.

Les phalanges, jusqu'ici en contact, basculent vers l'avant sur l'ongle, les talons s'élèvent. Le métacarpe devient plus oblique vers l'arrière et rompt la rectitude du lever avant-bras-canon. Le radius accentue sa flexion sur l'humérus, flexion qui avait déjà

commencé à la fin de la rotation. La rotation passive sous l'effet de l'énergie cinétique devient de plus en plus active à mesure que l'intervention musculaire s'accroît. La contraction des fléchisseurs des phalanges repousse en avant le rayon digité et le boulet. Le triceps et le grand dorsal agissent toujours de la même manière. Le pectoral ascendant tend maintenant à ouvrir l'angle scapulo-huméral aidé par le subclavier.

La détente est effective lorsque le membre a dépassé la verticale élevée sur le centre d'appui. Le triceps ouvre le coude. Le grand dorsal et le pectoral ascendant redressent l'humérus aidés par les anconés. Le rhomboïde et le trapèze tirent en avant le sommet de la scapula, provoquant ainsi l'ouverture de l'épaule.

Au moment du lever, la contraction du fléchisseur profond (perforant) fait basculer le pied sur son extrémité distale. Le genou soumis à une forte pression, tend à s'affaisser, mais les extenseurs du métacarpe et des phalanges le soutiennent en avant.

Résumé : Biomécanique du membre antérieur et le *stay apparatus*.

Les antérieurs reçoivent la poussée vers l'avant des postérieurs que relaie la colonne vertébrale. L'alignement vertical des articulations des membres antérieurs de l'omoplate aux doigts en position d'extension à l'appui et en statique, permet de supporter une charge importante. En effet, toute l'avant-main est constituée de la tête, de l'encolure et s'étend jusqu'aux dernières vertèbres dorsales. D'ailleurs, l'ancrage dans le sol au moment de la traction est favorisé par la forme plus ou moins vrillée de l'humérus en fonction des espèces.

Les membres antérieurs sont chargés d'amortir les chocs comme des ressorts. Ils ne sont fixés à la colonne vertébrale que par des sangles musculaires élastiques, sans aucune attache rigide. La suspension des membres antérieurs est assurée par une ceinture musculaire constituée d'un muscle en forme d'éventail (le grand dentelé) qui s'insère sur la face interne de l'omoplate et se fixe sur les côtes antérieures. Le grand dentelé est renforcé en face ventrale par les pectoraux qui s'insèrent sur l'humérus, ce qui permet de suspendre le tronc entre les omoplates

et les faces internes des bras et renforce la souplesse et l'amortissement à la réception d'un saut.

La stabilisation des membres antérieurs repose sur un dispositif de tendons et articulations très adapté à la charge importante à soutenir et qui permet le verrouillage des angles articulaires. En anglais ce système est appelé le *stay apparatus*.

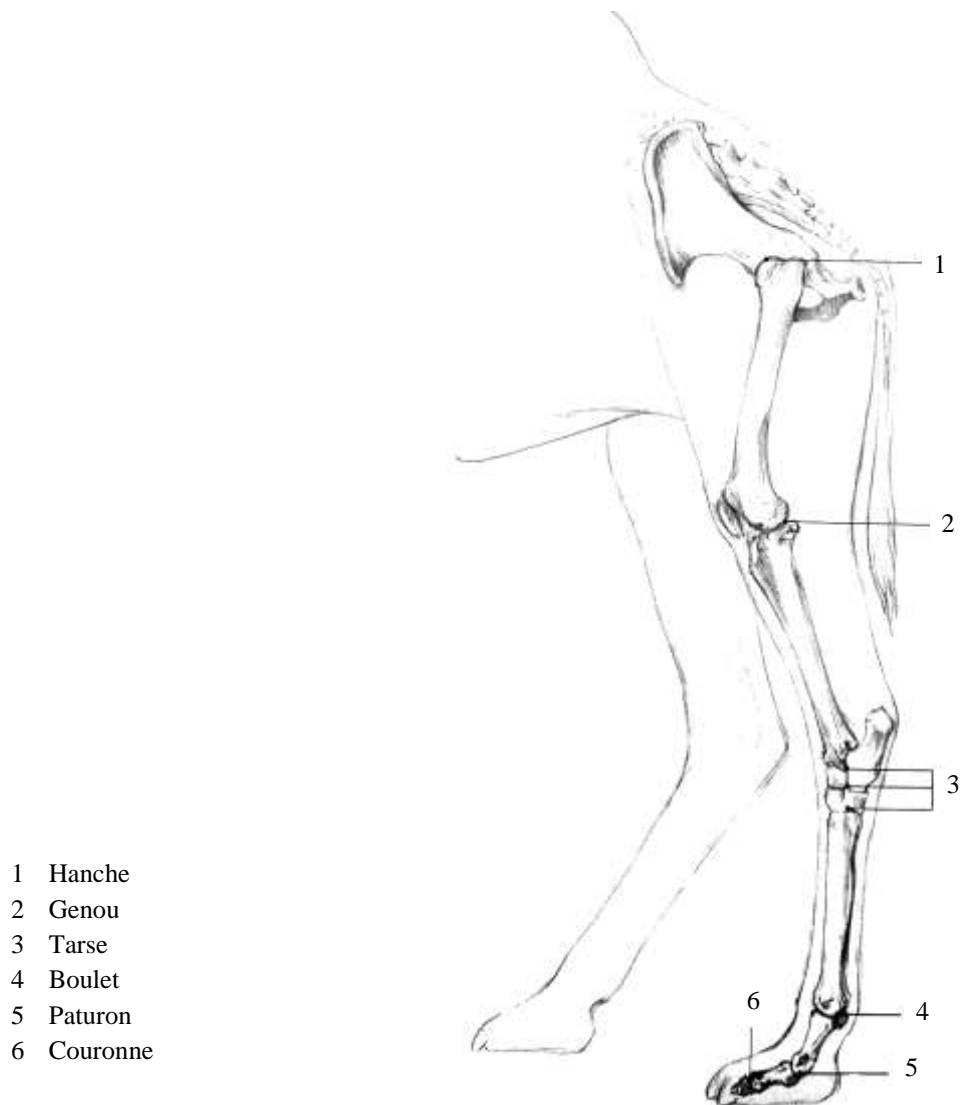
Les tendons du biceps relient l'omoplate au radius envoyant une autre extension tendineuse jusqu'au métacarpe par le relais de l'extenseur dorsal du doigt. Les tendons presque infatigables des muscles fléchisseurs (superficiel et profond) et leur prolongation en face palmaire des membres de l'humérus aux dernières phalanges représentent de forts tendeurs lors de l'application d'une charge. L'association des tendons fléchisseurs et extenseurs sur les faces palmaires et dorsales des membres sont comme les cordages d'un bateau qui stabilise le mât antérieur sans mobiliser les forces musculaires dans un souci d'économie d'énergie permanent.

Enfin l'articulation du coude est une ginglyme ou charnière parfaite qui se verrouille en extension faisant l'économie d'un travail musculaire.

II.3. Rappels anatomiques et biomécaniques du membre postérieur _____

Communément, dans les ouvrages de biomécanique nous apprenons que le membre postérieur est spécialisé dans la propulsion. Cependant lors de l'analyse de l'amble, il faut considérer aussi l'engagement du postérieur comme une possibilité non négligeable de couvrir du terrain. Ainsi, à l'heure d'observer un ambleur, qu'il fasse partie de la famille des camélidés, des équidés ou des canidés, force est de constater qu'il s'efforce d'exploiter au maximum sa phase propulsive mais surtout sa phase d'engagement afin de prolonger son temps d'envol permis par la vitesse acquise.

II.3.1. Biomécanique du postérieur : un véritable jeu de leviers _____



*Fig. 30 : Ostéologie du membre postérieur du dromadaire, vue sagittale - dessin
[Szunyoghy, 1996]*

II.3.1.1. Les leviers inter-appuis _____

Le membre postérieur bénéficie de leviers inter-appuis dans la détente et secondairement dans l'amortissement. Son efficacité dépend de la puissance du groupe musculaire et de la longueur du bras de levier.

- le levier trochantérique pivote autour de la hanche, son bras de levier est le grand trochanter (extrémité supérieure du fémur). Il est mobilisé par le fessier moyen.
- le levier rotulien se compose de la rotule, du tibia, des trois ligaments patellaires et du quadriceps fémoral. La contraction de ce muscle induit une translation vers le haut de la rotule qui provoque l'extension du grasset.
- le levier calcanéen est constitué par le calcanéum, le long bras de levier sur lequel se termine la corde du jarret composée par les deux tendons du gastrocnémien. Sa contraction provoque l'extension violente du jarret, et particulièrement celle de l'articulation tibio-talienne.

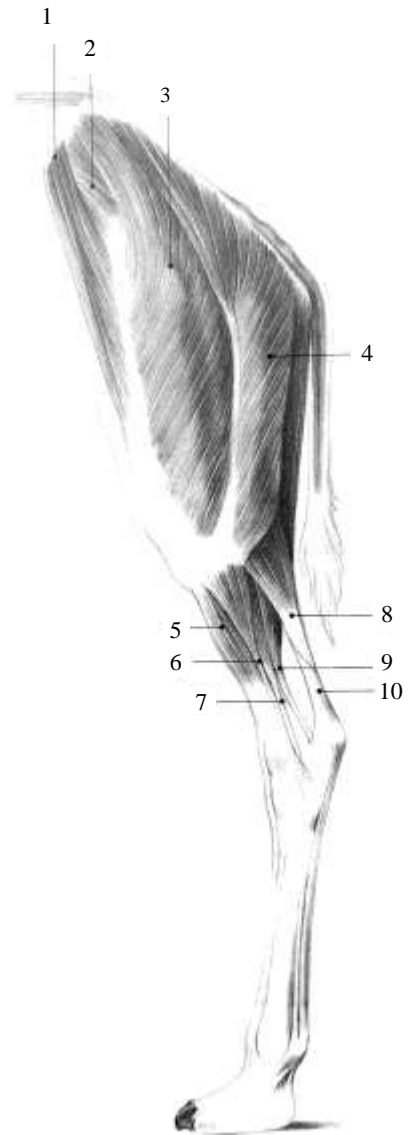
II.3.1.2. Les leviers inter-puissants _____

Ils interviennent surtout lors du soutien pour provoquer la flexion des articulations.

- Le levier ilio-psoas se termine sur le petit trochanter du fémur. Permet la flexion de la hanche et détermine ainsi l'engagement de l'ensemble du membre à la fin de la phase de soutien.
- Le levier fémoral caudal est constitué des muscles fémoraux caudaux insérés sur l'extrémité supérieure du tibia. Leur contraction provoque la flexion du grasset au cours du soutien.

II.3.2. Les groupes musculaires du membre postérieur _____

- 1 Muscle tenseur du fascia lata
- 2 Muscle moyen fessier
- 3 Muscle glutéobiceps
- 4 Muscle caudo-fémoral
- 5 Muscle extenseur commun des doigts
- 6 Muscle long péronier latéral
- 7 Muscle extenseur du doigt latéral ou extenseur du 4^e doigt
- 8 Muscle triceps sural
- 9 Muscle long fléchisseur commun des doigts
- 10 Muscle fléchisseur commun superficiel des doigts



*Fig. 31 : Myologie du membre postérieur du dromadaire, vue sagittale - dessin
[Szunyoghy, 1996]*

Cette liste simplifiée permet juste de retranscrire succinctement les différents mouvements des grands groupes musculaires du membre postérieur. Les tableaux en annexe permettent en parallèle de rentrer dans le détail anatomique.

- Muscles de la région dorso-lombaire : extenseur du rachis avec un rôle dans la propulsion.
- Muscles fessiers : action sur le coxal, le sacrum et le fémur. Propulsion.
- Muscles pelviens profonds : insérés autour de l'articulation coxo-fémorale. Proprioception et contention.
- Muscle de la région lombo-iliaque : flexion lombaire, du bassin et de la cuisse. Engagement postérieur.
- Muscles de la région fémoro crâniale : quadriceps.
- Muscles de la région fémorale caudale : fémoro-caudaux.
- Muscles de la région fémorale médiale : adducteurs de la cuisse et de la jambe et contention du coxal.
- Muscles de la région jambière crâniale : extension. Les extenseurs étendent les phalanges sur le métatarse. Ils fléchissent le pied sur la jambe au niveau du tarse. Ils agissent sur le fémur, le tibia, le tarse, le métatarse et les phalanges.
- Muscles de la région jambière caudale : pendant la station les fléchisseurs participent au soutènement du boulet et du jarret. Les fléchisseurs, latéral et médial, du doigt ainsi que le tibial caudal, ont un rôle dans l'impulsion et dans l'extension du tarse et des articulations inter-phalangiennes. Au soutien, ils fléchissent les phalanges les unes sur les autres, et le doigt sur le métatarse.

II.3.3. Biomécanique articulaire du membre postérieur _____

II.3.3.1. Articulation coxo-fémorale _____

Ses mouvements sont la flexion, l'extension, l'adduction, l'abduction, la circumduction et la rotation du fémur sur le bassin. Cependant, le faisceau prépubien du ligament rond limite les possibilités d'abduction. L'adduction est limitée par la tension des muscles fessiers. La circumduction n'est possible que dans la demi-flexion du membre.

II.3.3.2. Articulation fémoro-tibiale _____

Ses mouvements principaux sont la flexion et l'extension. Elle permet un mouvement accessoire, la rotation. Les mouvements de latéralité sont des plus réduits par la tension des ligaments collatéraux. On note un léger mouvement du jarret vers l'extérieur en semi-flexion grâce au biceps fémoral. La flexion du grasset envoie donc l'extrémité distale du membre vers l'extérieur permettant une fermeture de l'angle plus importante. La flexion forcée est limitée par la tension du quadriceps fémoral et par les ligaments fémoro-patellaires.

II.3.3.3. Articulation tibio-tarsienne _____

Charnière parfaite associée à la disposition particulière et à la puissance des ligaments collatéraux, elle ne présente pratiquement que des mouvements de flexion et d'extension entre le tibia et la poulie astragaliennne. D'autre part, des glissements limités des os des rangées tarsiennes entre eux ou sur le métatarse, sont possibles. Dans la flexion comme dans l'extension, ces ligaments subissent une tension croissante jusqu'à une position déterminée, au-delà de laquelle le mouvement se poursuit de façon automatique et brusque, qui fait qualifier cette jointure d'articulation à ressort.

II.3.3.4. L'appareil réciproque _____

Dans la station du membre postérieur, l'appareil réciproque permet de façon passive le verrouillage du jarret. Celui-ci est réalisable seulement si le grasset se trouve lui-même verrouillé par le mécanisme patellaire.

Ainsi, l'immobilisation du grasset entraîne la fixation du jarret mais également celle des articulations basses. L'absence de cette immobilisation entraînerait l'écroulement du membre postérieur sous le poids du corps. La biomécanique du postérieur des quadrupèdes doit sa performance à l'automatisme tarsien et à l'appareil réciproque qui permettent à la fois une synchronisation et une indépendance articulaire du grasset et du jarret comme nous allons le vérifier ci-dessous.

II.3.4. Mécanisme de propulsion et d'engagement lors de la foulée du postérieur

II.3.4.1. L'appui

L'appui correspond à l'amortissement où les angles articulaires tendent à se fermer sous l'action de la pesanteur et de la force vive. Les muscles résistent à l'affaissement par une action contractile freinatrice.

L'appui commence au poser du membre, alors qu'il est orienté obliquement vers l'avant. Il neutralise graduellement la réaction au sol par un raccourcissement général du postérieur qui s'obtient successivement par les fermetures des angles articulaires. La descente du boulet est freinée par la tension élastique du suspenseur du boulet et du fléchisseur superficiel (perforé). Lors de cette action freinatrice passive, ces tendons emmagasinent dans leur élongation l'énergie cinétique du choc qu'ils amortissent. Ils la restitueront par leur rétraction en élevant et projetant le boulet vers l'avant. C'est grâce à ces tendons que les allures sont souples et élastiques.

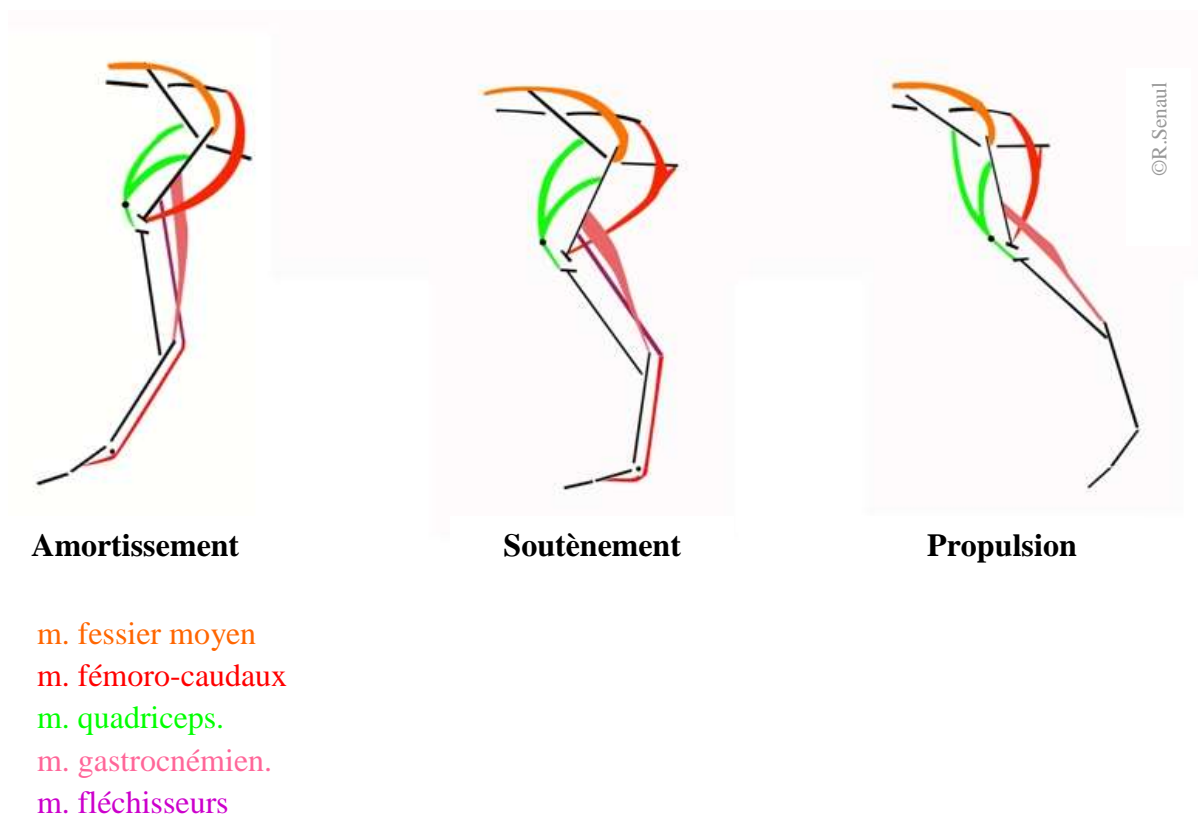


Fig. 32 : Schéma du membre postérieur à l'appui [R. Senault, 2013]

II.3.4.1.1. L'amortissement _____

L'amortissement se caractérise par la contraction excentrique qui va permettre de limiter la fermeture des angles et d'optimiser l'absorption des chocs et la lutte contre la gravité.

La tension du fléchisseur superficiel et du triceps sural s'oppose à l'affaissement du jarret en maintenant le métatarse étendu sur le tibia. La contraction des fémoro-caudaux par le moyen de la corde du jarret, concourt au maintien de l'ouverture de cet angle. La contraction du quadriceps fémoral ainsi que la corde métatarsienne empêchent la fermeture du grasset en limitant la flexion du tibia sur le fémur.

La fermeture de la hanche est limitée par la contraction excentrique des muscles fessier moyen et fémoraux caudaux. La flexion du genou est contrôlée par le muscle quadriceps fémoral. L'effondrement du jarret et du boulet est rendu impossible par la tension du fléchisseur superficiel du doigt.

Les fessiers s'opposent à la majoration de la flexion coxo-fémorale ainsi qu'à l'abaissement de l'ilium. Les fémoraux caudaux fournissent aussi un travail résistant par leurs tractions sur le fémur et le tibia, maintenant ainsi l'angle du grasset et tirant la pointe de l'ischium vers le bas pour freiner la descente de l'os coxal. Le redressement de l'ilium résulte de la cessation de contraction des psoas et des abdominaux au soutien ayant opéré la flexion du fémur sur le bassin en voûtant les lombes.

L'action des extenseurs du rachis, mis alors sous tension, viendra ajouter à ce mouvement de descente du coxal, l'extension des lombes au cours de la phase suivante.

II.3.4.1.2. Le soutènement _____

Suite à la contraction excentrique de la phase précédente, le soutènement va favoriser la contraction isométrique du fessier moyen et des fémoro-caudaux. Le soutènement se produit par le basculement du membre, et le passage de ce membre à la verticale autour de P2. La bascule de P2 sur P3 vers l'avant, relâche le perforant, la détention des suspenseurs fait remonter le boulet. Pendant cette phase, le membre joue le rôle d'un rayon tournant avec une fermeture des angles articulaires afin d'éviter l'élévation de la hanche. Le raccourcissement du membre permet de réduire la

déperdition des forces propulsives. Ainsi, en conservant un plan horizontal, le corps est poussé vers l'avant au lieu d'être soulevé. Cette avance du postérieur marque la mise sous tension des muscles propulseurs. Les muscles intrinsèques du membre ont uniquement un effet amortisseur. Les muscles extrinsèques agissent à la fois comme amortisseurs et propulseurs.

La hanche et le genou sont maintenus en extension par le muscle fessier moyen et les muscles fémoraux caudaux. Le jarret est maintenu en extension par la tension du muscle superficiel du doigt et par la contraction active du muscle gastrocnémien. Le boulet est soutenu par le ligament suspenseur du boulet.

Les fémoraux caudaux poussent l'ischium en avant, cette poussée se combine avec l'énergie cinétique pour donner une résultante attirant le coxal en avant et en bas. Les adducteurs agissent comme les fémoraux caudaux avec moins d'effet propulsif, du fait de leurs insertions et de leviers moins importants. Les fessiers étendent le fémur et par synergie, tout le membre qui oscille autour du pied. L'acétabulum soumise à la poussée du fémur entraîne la bascule en avant du coxal. Le quadriceps fémoral contribue au redressement du tibia sur le fémur. La contraction des fléchisseurs du pied élève le boulet, le porte en avant. Au moment du lever, elle produit la bascule du pied.

Dans la 2^{ème} partie de la phase d'appui, il résulte simultanément une flexion du grasset et une extension du jarret. Lorsque le membre est à la verticale le gastrocnémien étend le jarret afin de stabiliser cette articulation qui est chargée par le poids du corps. Cette extension entraîne une tension sur le 3^{ème} Péronier. Celui-ci emmagasine de l'énergie. Dès que le sabot quittera le sol, il ramènera le jarret en synchronisation avec le grasset.

II.3.4.1.3. La propulsion ou la détente _____

La propulsion commence après que l'axe du membre a dépassé la verticale du sabot. Lors de la propulsion, l'énergie potentielle emmagasinée est libérée dans cette phase par une contraction concentrique des fessiers moyens et des fémoro-caudaux.

La rotation autour de P2 se poursuit jusqu'à l'instant de la préparation au lever. Au lever, le sabot bascule vers l'avant sur sa pince, par soulèvement des talons, et le

pivot de rotation se transfère de la dernière articulation du doigt à la pince. Puis tous les angles articulaires s'ouvrent du bas vers le haut. L'action des muscles propulsifs ne peut se concevoir que par une détente des articulations et surtout grâce à une action des leviers.

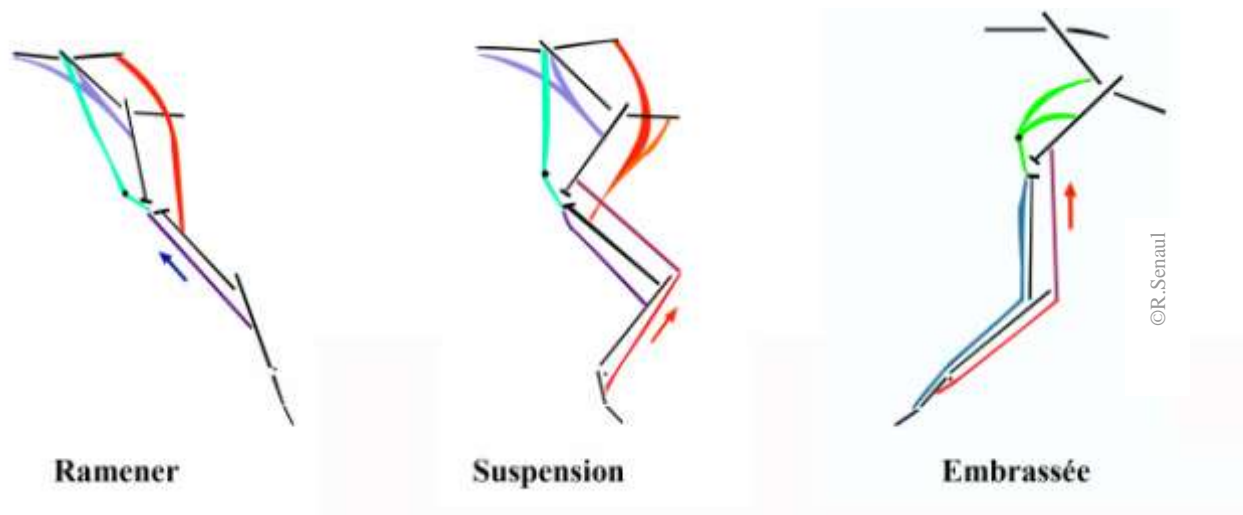
La contraction concentrique des groupes musculaires engendre l'ouverture violente de toutes les articulations. Le muscle fessier moyen et les muscles fémoraux caudaux produisent l'extension de la hanche. Ces derniers et le quadriceps participent à l'ouverture du genou. Le muscle gastrocnémien provoque l'extension violente du genou. Le muscle superficiel du doigt remonte le boulet.

La contraction des fléchisseurs du pied élève le boulet, le porte en avant. Au moment du lever, elle produit la bascule du pied en pince sur la partie distale de P3 et l'élévation des talons. Ce mouvement ancre l'extrémité distale du membre au sol et développe un effet de détente et de bascule en avant. Le tendon du fléchisseur profond des doigts (perforant) est fortement mis à contribution.

Le triceps sural ouvre le jarret et le porte en avant par une action de levier aidé par la traction des fémoraux caudaux sur la corde du jarret. Indirectement, la corde fémoro-métatarsienne, tendue par l'ouverture de cet angle, opère l'extension du membre postérieur. Les fémoro-caudaux étendent le grasset en redressant le fémur et le tibia l'un contre l'autre, tout en poussant l'ischium en avant. De fait, les fessiers ouvrent l'angle coxo-fémoral. Les deux vastes du quadriceps fémoral étendent le grasset. La phase de détente rassemblant toutes les forces propulsives du membre est la plus importante à l'appui.

II.3.4.2. Le soutien

Elle débute au moment du lever et se divise en trois phases au cours desquelles le membre oscille vers l'avant. Grâce à l'action de l'appareil réciproque, le grasset et le jarret fléchissent toujours ensemble. Cette phase de solidarisation articulaire est fortement vérifiée durant cette phase de soutien.



- m. fémoro-caudaux
- m. quadriceps.
- m. gastrocnémien.
- m. fléchisseurs
- m. ilio-pectineus
- m. tenseur du fascia lata
- m. extenseurs

Fig. 33 : Schéma du membre postérieur au soutien [R. Senault, 2013]

II.3.4.2.1. Le ramener _____

Cette phase se caractérise par une flexion des articulations grâce à la contraction concentrique des différents groupes musculaires. Le ramener correspond à la phase de relèvement et de raccourcissement. Il s'opère une flexion maximale des phalanges sur le métatarse et une légère flexion du jarret et de la hanche s'amorce. Le ramener du membre s'effectue donc grâce à la flexion des articulations.

Pour la flexion de l'articulation coxo-fémorale : le muscle ilio-pectineus et les muscles fémoraux crâniens (tenseur du fascia lata et muscle droit de la cuisse du quadriceps) soulèvent et ramènent le membre sous le tronc.

Le jeu de l'appareil réciproque synchronise ce mouvement. La flexion de l'articulation fémoro-tibiale débute grâce aux muscles fémoro-caudaux. Les fémoraux caudaux et le poplité remontent le tibia en fermant l'angle caudal du grasset. Sa fermeture accentue celle du jarret (corde fémoro-métatarsienne). L'ilio-pectineus et le

fessier superficiel fléchissent le fémur, ce qui accentue la fermeture du jarret (corde fémoro-métatarsienne). L'ilio-psoas et le fessier superficiel fléchissent le fémur sur l'ilium. Le 3^{ème} péronier amène le jarret en synchronisation articulaire avec le grasset. Le tibial crânial fléchit le métatarse.

Les fléchisseurs des phalanges fléchissent fortement les onglons sur le boulet.

II.3.4.2.2. La suspension

La flexion se poursuit avec la fermeture du grasset et la flexion automatique du jarret par la corde fémoro-métatarsienne. La flexion des phalanges se fait par le renvoi calcanéen.

Dans cette phase, toutes les articulations sont fléchies : la flexion de la hanche est accentuée par la contraction concentrique des muscles ilio-psoas et des muscles fémoraux crâniiaux, la contraction des muscles fémoraux caudaux fléchit au maximum l'articulation fémoro-tibiale, la flexion du jarret est provoquée automatiquement par la corde fémoro-métatarsienne, le renvoi calcanéen contribue à la flexion des articulations basses. La suspension implique une flexion importante du jarret et de la hanche entraînant la fermeture consécutive de tous les angles articulaires, sauf celui du boulet qui commence à s'ouvrir par l'extension des phalanges initiée par l'action de l'extenseur des phalanges.

Puis l'extension que l'on appelle aussi embrassée, correspond à l'allongement maximum du membre. L'extension du tibia jusqu'aux phalanges provoque l'ouverture du boulet puis du jarret et du grasset. Le rayon digité tend même à devenir horizontal pour porter le pied loin en avant. La hanche, en revanche, est toujours fléchie. L'extension rapide qui suit, jette le membre en avant, permettant ainsi au camélidé d'utiliser la force vive ainsi emmagasinée pour la production d'une longue enjambée. Le quadriceps fémoral avec le tenseur du fascia lata fléchit le fémur en étendant le grasset. Le mouvement d'extension gagne le jarret par l'action de l'extenseur dorsal des phalanges ce qui ouvre l'angle tibio-métatarsien. Les adducteurs fléchissent le fémur avec l'aide des psoas et du droit de la cuisse. L'angle coxo-fémoral ne s'ouvre qu'au moment du poser par le relâchement de la contraction de ces muscles.

L'appareil réciproque permet dans cette phase que le grasset et le jarret soient en parfaite synchronisation. Le grasset est fléchi par la contraction des fémoro-caudaux. Le jarret est, lui, fléchi passivement par le 3^{ème} péronier qui est tracté vers le haut.

II.3.4.2.3. L'engagement _____

L'engagement se caractérise par une dissociation des mouvements articulaires, l'articulation coxo-fémorale se maintient en flexion. Dans l'engagement du postérieur, la contraction excentrique des muscles fémoraux crâniens (quadriceps) permet l'extension du genou tandis que le jarret s'ouvre automatiquement par la traction exercée vers le haut par le muscle fléchisseur du doigt. La contraction du muscle extenseur du doigt provoque l'extension du boulet et des phalanges. Les muscles fémoro-crâniens étendent le grasset et le jarret.

A la fin de la phase de soutien, le quadriceps fémoral étend simultanément le grasset et le jarret grâce à l'appareil réciproque.

Pendant la 1^{ère} partie de la phase d'appui, le grasset et le jarret sont fléchis mais le jarret un peu moins. La flexion importante du genou va favoriser l'absorption du choc au poser.

Résumé : Biomécanique du postérieur et rôle de l'appareil réciproque et de l'automatisme tarsien dans la biomécanique du postérieur.

Au poser du postérieur, le tendon du fléchisseur du doigt est étendu par le poids du corps et emmagasine de l'énergie cinétique. Tandis que la flexion du grasset, par les muscles fémoraux caudaux, provoque un étirement du 3^{ème} péronier qui emmagasine également de l'énergie potentielle grâce à ses capacités élastiques. Lors de la propulsion, l'énergie emmagasinée par le tendon fléchisseur superficiel du doigt est libérée, permettant ainsi la flexion du boulet et l'extension du jarret. Lors du soutien, l'énergie emmagasinée par le 3^{ème} péronier est libérée, entraînant la flexion du jarret.

Les extensions alternatives des différentes cordes de l'appareil réciproque durant la phase d'appui, permettent d'emmagasiner de l'énergie qui est restituée

lors de la phase de soutien. L'énergie cinétique libérée lors la poussée du postérieur favorise son engagement sous la masse du quadrupède et permet d'allonger les foulées et de couvrir beaucoup de terrain. Un tel mécanisme permet en plus d'économiser de l'énergie durant la locomotion.

L'automatisme tarsien, cette spécialisation du jarret, permet aussi une économie d'énergie grâce à une mobilité semi-automatique en flexion / extension de l'articulation tibio-talienne. Cette force cinétique s'apparente au fonctionnement d'un ressort.

Pour conclure sur l'appareil réciproque et l'automatisme tarsien, les extensions alternatives de ses tendons durant la phase d'appui permettent d'emmagasiner de l'énergie potentielle laquelle est restituée en énergie cinétique durant la phase de soutien. Ce mécanisme permet donc d'optimiser l'utilisation de l'énergie durant la locomotion.

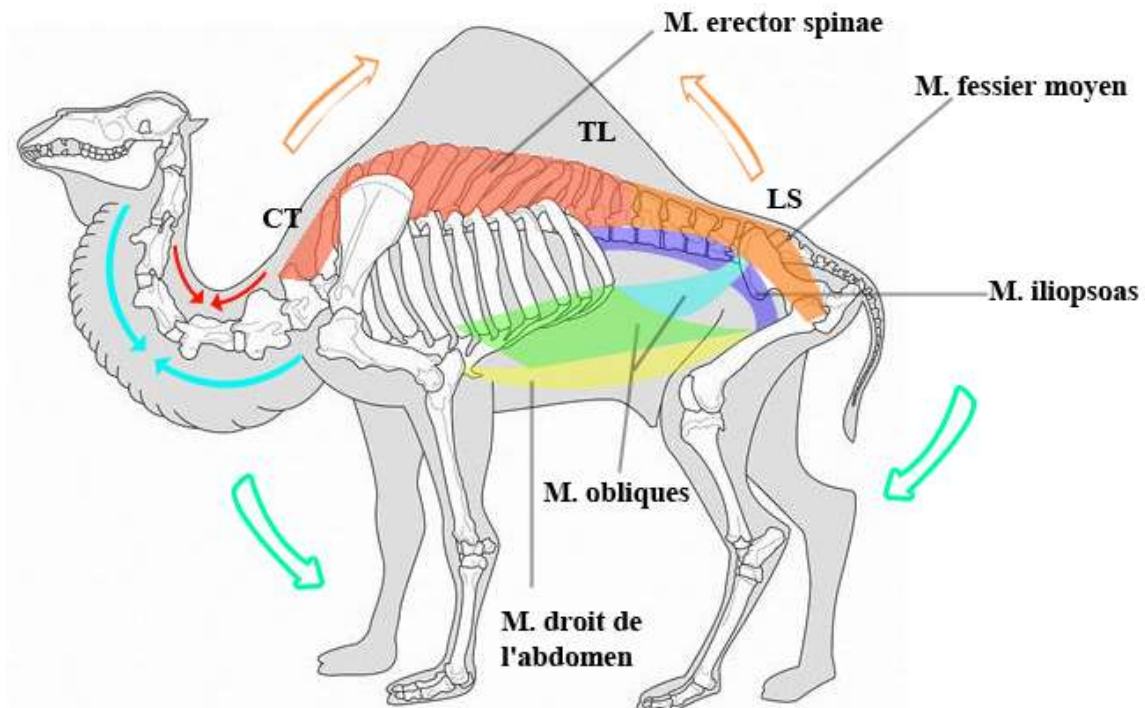
II.4. Biomécanique du rachis pendant la foulée _____

Le tronc sert d'assise aux muscles qui mobilisent toutes les parties du corps et facilite la collaboration des membres dans la propulsion. Sa musculature répond à ce double but :

- Rigidification du rachis : elle sauvegarde la souplesse et l'élasticité de toutes les allures. Le tronc s'affermi d'autant plus que le travail des membres est plus dur et l'effort plus grand.
- Collaboration à l'impulsion : la musculature du tronc joue un rôle capital dans les changements de direction. Elle déplace alternativement le centre de gravité d'avant en arrière, d'un côté à l'autre, et dispose le rachis à recevoir l'action des membres.

Avant de voir plus en détail les différentes fonctions du rachis du quadrupède, le schéma ci-dessous rappelle les grands groupes musculaires de mobilisation du rachis et du tronc en termes de mouvements majeurs (flexion/extension).

Chaîne dorsale : extension



©R.Senault

Chaîne ventrale : flexion

CT : charnière cervico-thoracique, TL : charnière thoraco-lombaire, LS : charnière lombo-sacrée.

Fig. 34 : Schéma des mouvements majeurs autour du rachis d'un dromadaire
[R. Senault]

II.4.1. Fonctions du rachis cervical

Premièrement, il faut rappeler que les rôles de contention et de contrôle proprioceptif sont assurés par les muscles juxta-vertébraux [ANNEXE 4]. Ils sont très importants sur le rachis cervical qui assure sa fonction de balancier et par là même, règle la biomécanique dans la locomotion du quadrupède.

Deuxièmement, les insertions de certains muscles de la région cervicale dorsale participent de la fonction de synergie entre l'encolure et le tronc par les insertions sur le crâne, les processus épineux et les corps des vertèbres cervicales.

L'encolure joue le rôle d'un balancier dont les oscillations aident soit à la rigidification du tronc, soit à l'impulsion.

II.4.1.1. Extension globale de l'encolure (de C0 à la charnière cervico-thoracique)___

- Le splénius, puissant extenseur.

Avec un point fixe à la tête, le splénius tire les épineuses du garrot vers l'avant. Cette action presse les corps vertébraux les uns contre les autres et affermit le garrot en le vouûtant. Les épineuses des premières dorsales étant ainsi fixées peuvent fournir un appui ferme à la contraction des muscles dorsaux qui se contractent sans entraîner d'extension de la partie antérieure du dos. L'action du splénius est d'autant plus efficace que le muscle est plus tendu par une position basse de l'encolure et de la tête. La contraction permanente du splénius maintient par son raccourcissement toute la base d'encolure affaissée et fixée vers l'avant.

- Le multifide du cou (juxtavertébral de C0 à C7).

Il étend l'encolure et incline les vertèbres cervicales l'une sur l'autre en renversant l'encolure. Il aide ainsi à la rigidification de la colonne cervicale pour une insertion solide des muscles dorsaux et des protracteurs du membre antérieur.

II.4.1.2. Flexion globale de l'encolure_____

- Long du cou (juxtavertébral).

Il accentue la convexité vers le haut de la courbure antérieure de l'encolure. Son action se prolonge sur la partie antérieure du pont thoracique qui de ce fait participe légèrement à la voûture de l'encolure et à l'élévation de sa base.

- Muscles juxtavertébraux latéro-flexeurs.

L'iliocostal du cou étend l'encolure et l'incurve.

Les muscles intertransversaires du cou affermissent l'encolure dans une action bilatérale : fixation de la position de l'encolure.

L'oblique caudal de la tête est le rotateur n°1 qui fait pivoter l'atlas sur l'apophyse odontoïde de l'axis. Par action bilatérale, il empêche toute rotation et affermit l'articulation atlas-axis.

II.4.2. Fonctions de la portion thoracique du pont vertébral _____

La portion thoracique de l'axe vertébral soutient le tonneau formé par la cage thoracique. Les fonctions principales de cette cage thoracique sont celle de protection des organes vitaux cardio-respiratoires et celle de la respiration. A ce propos, l'un des grands avantages de l'amble est de « favoriser la ventilation pulmonaire grâce au balancement latéral du corps qu'elle suscite, par opposition aux secousses verticales que provoque le trot » [Encyclopédie du cheval, Maloine, 1980]. Cette particularité locomotrice favoriserait l'amplitude maximale du diaphragme (muscle acteur de la respiration) grâce à l'équilibre des mises en tensions entre la ligne du dos et la ligne abdominale. L'absence de torsion thoraco-lombaire dans cette allure latérale ne sollicite pas ce point d'insertion des piliers du diaphragme.

II.4.2.1. Flexion du thorax _____

La flexion thoracique est principalement assurée par les muscles abdominaux (obliques externe et interne). Les muscles pectoral ascendant, subclavier, trapèze dorsal, dentelé ventral du thorax jouent aussi ce rôle secondaire de flexion du thorax.

II.4.2.2. Extension thoracique et thoraco-lombaire _____

L'erector spinae est composé de trois muscles qui se prolongent du bassin vers l'encolure par les muscles du cou : l'iliocostal thoraco-lombaire, l'épineux du thorax et le longissimus du thorax.

L'épineux du thorax ne gêne pas la respiration car il ne s'insère pas sur les côtes. Il agit dans l'affermissement du dos.

Le longissimus du thorax est l'extenseur n°1, il joue un rôle de soutènement du pont entre les antérieurs et les postérieurs. Il aide ainsi à la propulsion en enrayant la flexion du tronc qui lui succède. Si les deux insertions sont fixes, ce muscle rigidifie le

dos-rein. Dans l'extension, les épineuses se plaquent les unes contre les autres. Dans toute autre position, son action équilibre l'action antagoniste des fléchisseurs, le rachis immobile est alors entouré d'une gaine de muscles contractés.

II.4.3. Fonctions du rachis thoraco-lombaire et bassin _____

II.4.3.1. La flexion thoraco-lombaire _____

Le grand dorsal en assure sa principale fonction.

Le transverse des côtes collabore ainsi que le scalène à l'établissement d'un tractus fléchisseur continu allant du bassin à l'encolure.

L'oblique externe de l'abdomen : si les deux insertions sont fixes avec un travail en latéralité des membres, le pont est rigidifié en créant un équilibre à l'extension des dorsaux tant dans la flexion que dans l'extension du rachis.

L'oblique interne de l'abdomen est un auxiliaire de l'expiration. Et avec le transverse de l'abdomen, il comprime les viscères contre le rachis ce qui participe de la rigidification du tronc.

Le droit de l'abdomen représente le trait d'union thorax-bassin. Si les deux insertions sont fixes par un travail en latéralité des membres, l'action des dorsaux est neutralisée dans la flexion ou l'extension et le rachis est rigidifié. Quand les antérieurs ou les postérieurs se reçoivent au sol après un temps de suspension, le droit de l'abdomen fléchit le dos-rein et s'oppose ainsi à l'infléchissement du rachis sous l'effet de la force vive du mouvement ou de la pesanteur. Par le ligament prépubien (faisceau du ligament rond), le droit de l'abdomen presse la tête du fémur contre l'acétabulum s'opposant à l'abduction du membre. Il produit l'engagement marqué des postérieurs.

Les abdominaux sont un des groupes les plus importants de l'économie. La tunique jaune joue le rôle d'une vaste sangle qui porte les viscères tandis que l'appareil locomoteur travaille librement à la performance des allures. La ligne blanche est un cordon fibreux sur laquelle s'insèrent les muscles abdominaux. Elle maintient l'union des piliers antérieurs et postérieurs du pont vertébral et s'oppose à une trop forte extension du bassin.

II.4.3.2. Flexion lombo-sacrée et bassin _____

La flexion est assurée par les muscles iliaque, petit psoas et fessier moyen.

II.4.3.3. Extension lombo-sacrée et bassin _____

Au pas non amblé, l'erector spinae, le fessier superficiel, le fessier accessoire, le tenseur du fascia lata ainsi que le pectoral ascendant, permettent l'union fonctionnelle avec l'oblique externe de l'abdomen ce qui permet la collaboration du postérieur et de l'antérieur du même latéral. La contraction simultanée des deux muscles incurve le dos-rein d'un côté et produit à la fois l'engagement du postérieur et la détente de l'antérieur.

Par contre à l'amble, « l'ambleur ne risque pas de se contusionner lui-même les deux membres d'un même bipède latéral puisque ces deux membres font ensemble le même mouvement sur le plan sagittal. Le quadrupède ambleur n'est pas obligé d'écarter acrobatiquement ses membres postérieurs sur des pistes largement excentriques par rapport à celles de ses antérieurs. » [Encyclopédie du cheval, Maloine, 1980]

Résumé :

Les phases de la foulée de l'ambleur comme illustration du lien structure-fonction.

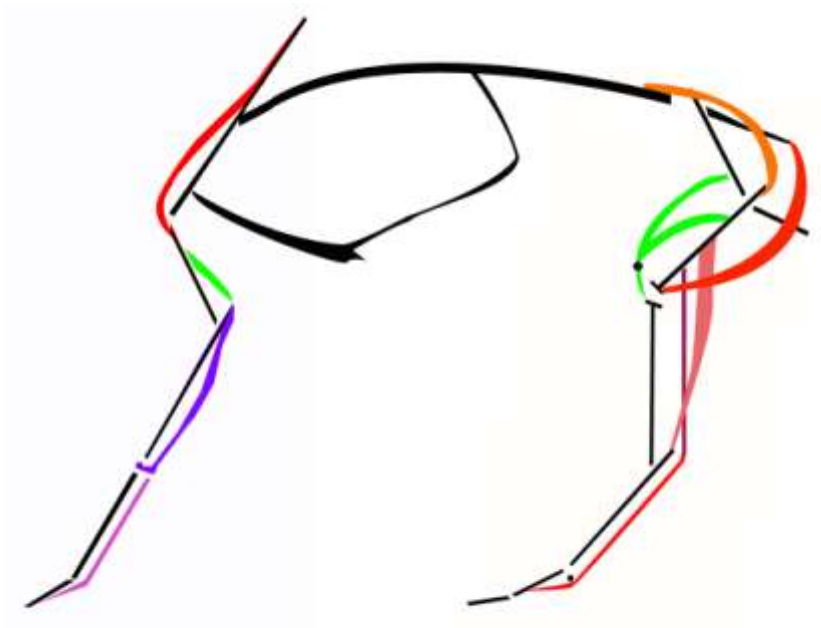
- **L'appui (schémas : figures 35 à 37)**
- **Le soutien (schémas : figures 38 à 40)**

La décomposition des différentes phases de la foulée du camélidé nous a rappelé que les membres n'effectuent pas leur oscillation tout d'une pièce :

Au début du soutien, leurs différents segments se replient; puis ils s'étendent à la fin du soutien pour couvrir le terrain (membre antérieur) ou s'engager (membre postérieur).

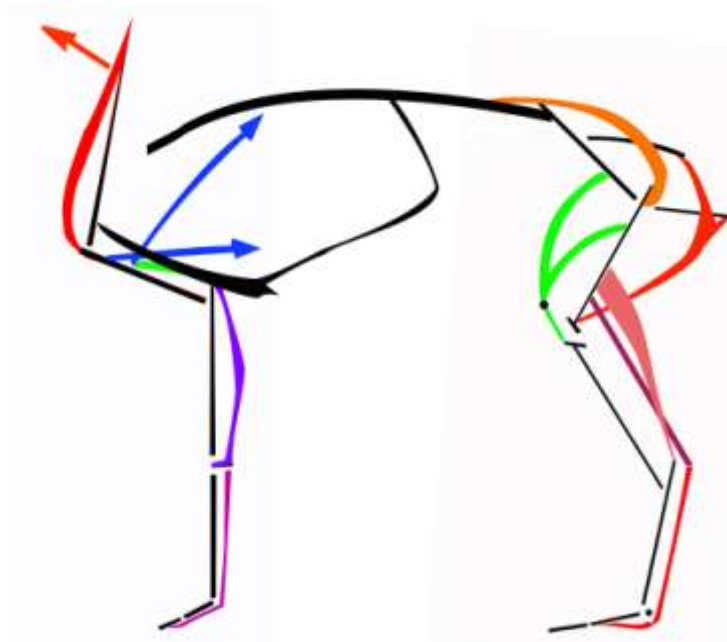
Au début de l'appui ils se ploient à nouveau pour amortir les réactions du sol (muscles fléchisseurs) puis se détendent à la fin de l'appui pour effectuer la propulsion (muscles extenseurs). Harmonieuse alternance de flexion et d'extension, génératrice de mouvements.

La rectitude du rachis est maintenue pendant toutes ces phases de la foulée, telle une poutre rigidifiée par les haubans musculaires.



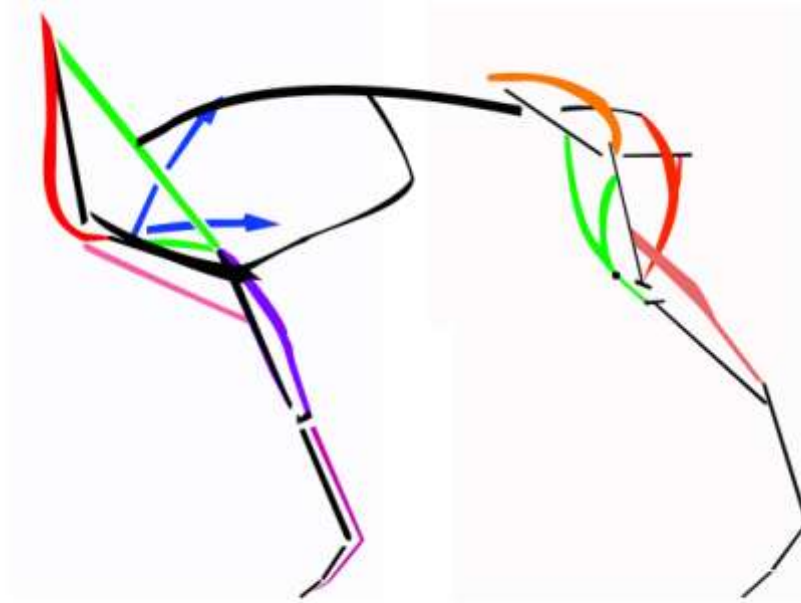
©R.Senault

Fig. 35 : Phase d'appui : le soutènement - dessin [R. Senault, 2013]



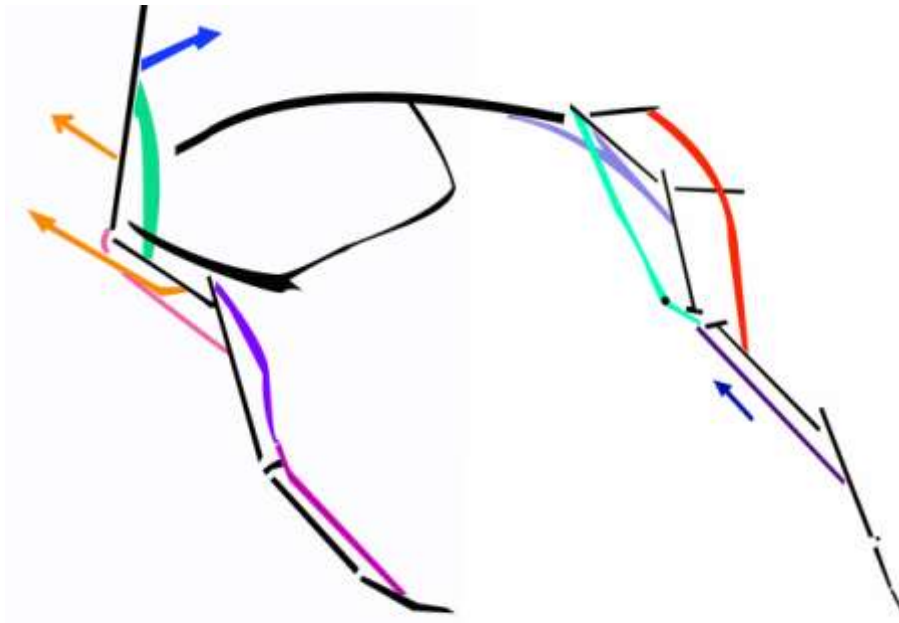
©R.Senault

Fig. 36 : Phase d'appui : le soutènement - dessin [R. Senault, 2013]



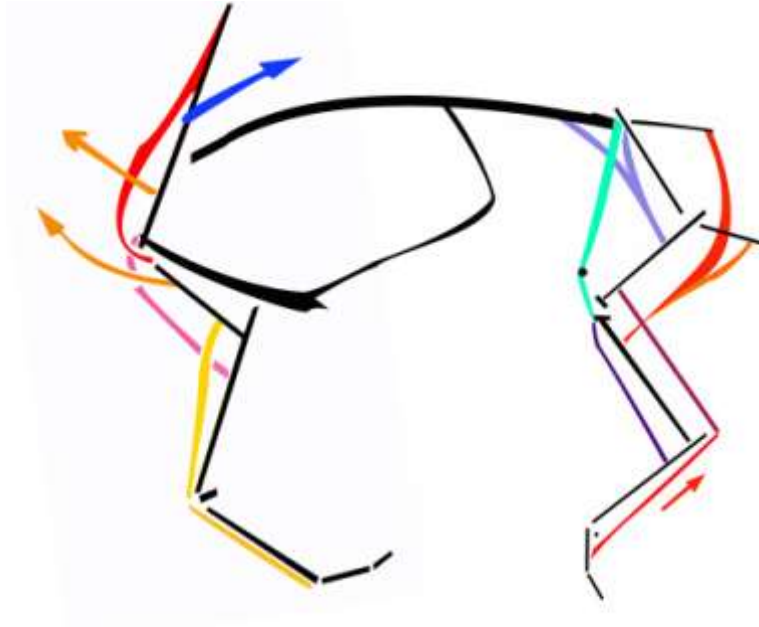
©R. Senault

Fig. 37 : Phase d'appui : la propulsion- dessin [R. Senault, 2013]



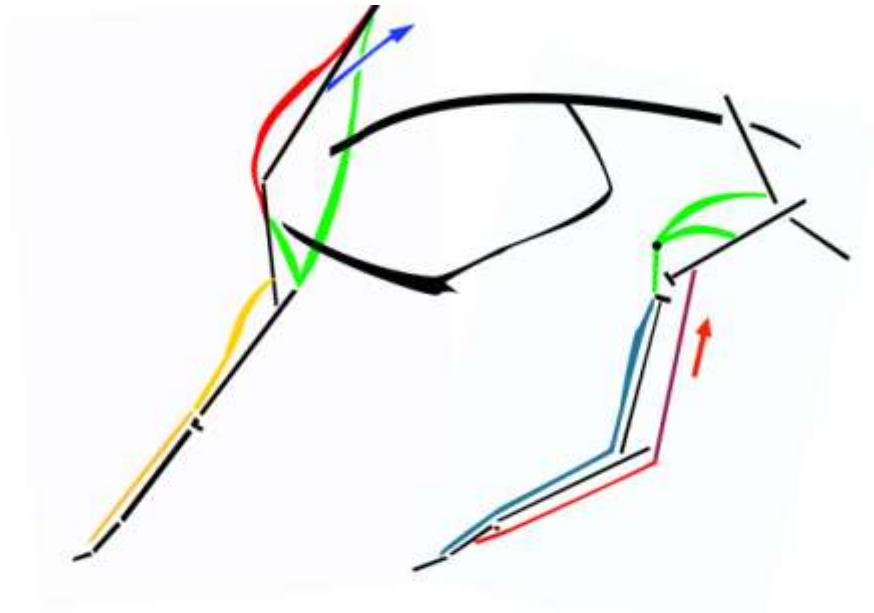
©R. Senault

Fig. 38 : Phase de soutien : le ramener- dessin [R. Senault, 2013]



©R. Senault

Fig. 39 : Phase de soutien : la suspension- dessin [R. Senault, 2013]



©R. Senault

Fig. 40 : Phase de soutien : l'embrassée- dessin [R. Senault, 2013]

Chapitre III : Conclusion

Nous venons de voir de manière synthétique et simplifiée l'expression de la fonction biomécanique du rachis et des membres que le quadrupède ambleur réalise dans les différents mouvements à l'amble. Les principaux muscles mis en jeu ont été soulignés. Nous rappelons qu'il s'agit d'une expression physiologique, d'une allure naturelle.

Mais comme expliqué dans les chapitres précédents, l'ambleur fonctionne sur ses leviers verticaux, majoritairement en préservant les mouvements de son rachis. Ainsi, il utilise la gravité en utilisant ses membres (véritables piliers extensibles) comme des ressorts à piston plutôt que de solliciter en torsions sa poutre vertébrale. Les schémas ci-dessus résument les mouvements des membres et représentent la rectitude du rachis lors des foulées successives.

Telle qu'elle a été décrite dans cette partie, cette allure amblée est exempte de toute adaptation et ne prend pas en compte d'éventuelles particularités anatomiques individuelles ou lésion(s) anatomique(s). L'hypothèse d'une dysharmonisation structurale a été écartée dans le premier chapitre sur les équidés ambleurs. Ceux-ci peuvent autant être issus d'une sélection adaptative acquise et favorisée par croisements génétiques, que dressés à ce mode de déplacement acquis. De la même façon que le cheval d'équitation fonctionne par bipèdes diagonaux, parce qu'il a été sélectionné et travaillé en ce sens pour satisfaire des normes équestres et pour s'adapter aux terrains d'exercices des centres d'équitation.

Ensuite, le chapitre sur la biomécanique des camélidés, à travers l'étude succincte de l'anatomie locomotrice de quelques uns d'entre eux, nous a permis de décrire une allure naturelle partagée par bon nombre d'espèces quadrupèdes. Toutes ces espèces animales issues de continents différents partagent un point commun : elles proposent une réponse physiologique et biomécanique à des contraintes environnementales difficiles.

Bibliographie

- Actes de l'atelier international sur le chameleon*. Ouarzazate (Maroc) - du 24 au 26 octobre 1999. [International Workshop on the Young Camel]. Cirad, département Emtv; 2000.
- Actes du 12^e Congrès de médecine et chirurgie équine*. Genève (Suisse) - du 11 au 13 décembre 2012- 206p.
- ALEXANDER R. “*Optimization of muscles and movement for performance or economy of energy*”. In *Netherlands Journal of Zoology*. 2000; Volume 50, N°2 pp.101-112.
- ALEXANDER R. “*Walking and running strategies for humans and other mammals*”. In BLAKE. P.W & DOMENICI. P. *Biomechanics in Animal Behaviour*, Oxford. 2000; 334p; pp.47-57.
- ALEXANDER R. *Energy for Animal Life*. Oxford. Oxford University Press;1999.
- ALEXANDER R. *The synchronisation of ventilation and locomotion in horses (Equus caballus)*. Université de Leeds; pp.19-31., mai 1992.
- ALEXANDER R. *A model of bipedal locomotion on compliant legs* Phil Trans Roy Volume 338. 1992.; pp.189-198.
- BADAWY M. Adel. *Computed tomographic anatomy of the foot in one humped camel*. Faculty of veterinary Medecine, Qalubia, Egypt, 2011, 423p.
- BARONE R. *Anatomie comparée des mammifères domestiques, Tome 1 : Ostéologie*. Paris : Editions Vigot ; 1999. 761pages. 4^{ème} édition.
- BARONE R. *Anatomie comparée des mammifères domestiques, Tome 2 : Arthrologie et Myologie*. Paris : Editions Vigot ; 2010. 1021 pages. 4^{ème} édition.
- BARONE R. *Anatomie comparée des mammifères domestiques, Tome 7 : Neurologie II*. Paris : Editions Vigot ; 2010. 838 pages.
- BLANC Barbara. *La locomotion de la girafe (giraffa camelopardalis) : contribution à l'étude cinématique et à la répartition des forces de pressions sur le pied*. ENV Nantes, 2012, 148p.
- CARENTON J.M. *Conservation des carnivores du nord est argentin à travers la participation des populations locales*. Rapport annuel d'activités ; 2003. 33p.

- CARENTON J.M. *Les loups à crinière*. CERZA. 2004. conservation, bulletin n°3.
- CHAMBRY, Pierre. *Allures et sentiments*. Paris : Editions Maloine ; 1990, 216p.
- COURTENAY O. *Conservation of the Maned Wolf : fruitful relationships in a changing environment*. Canid News, 2; 1994.
<http://www.canids.org/PUBLICAT/CNDNEWS2/manedwf2.htm>
- CREVIER-DENOIX Nathalie, ROBIN Damien, POURCELOT Philippe, FALALA Sylvain, VALETTE Paul, DENOIX Jean-Marie, CHATEAU Henry. *Le projet Sequisol: évaluation biomécanique de l'effet des sols équestres sur l'appareil locomoteur du cheval*. Bull. Ac. Vét. France, 2009, tome 162, N°2
<http://www.academie-veterinaire-defrance.org>.
- DAMASIO Antonio R. *L'erreur de Descartes*. Paris: Ed. Poche Odile Jacob; 2001, 396p.
- DE ALMEIRA JACOMO A.T., SILVEIRA L., FELIDOZA DINIZ-FILHO J.A. *“Niche separation between the maned wolf, the crab-eating fox and the hoary fox in central Brazil.”* In *Journal of Zoology*, London. 2004; pp.99-106.
- DE ARRUDA BUENO A., MOTTA-JUNIOR J. C., 2004. *“Food habits of syntopic canids, the maned wolf (Chrysocyon brachyurus) and the crab-eating fox (Cerdocyon thous)”*. In *southeastern Brazil*. Revista Chilena de Historia Natural, 77p.
http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0716-078X2004000100002...
- DENOIX J.M., PAILLOUX J.P. *Approche de la kinésithérapie du cheval*. Paris : Ed. Maloine ; 2005, 288p.
- ENOFF P. « *Analyse cinétique de la foulée en physiologie sur un pied nu* » in *L'Ostéo4pattes* n°26, automne 2012.
- FAYE B., MEYER C., MARTI A. *Le dromadaire. Références bibliographiques, guide de l'élevage et médicaments* [The dromedary. Synopsis of information on the dromedary, rearing and remedies], Montpellier: Ed. Cirad/Sanofi Santé nutrition animale.1999.
 Cédérom PC ISBN : 2-87614-369-0
- FLETCHALL N. B., RODDEN M., TAYLOR S., *Husbandry manual for the maned wolf*. Washington. 1995; 93p.
<http://zcog.org/zcog%20frames/Maned%20Wolf%20SSPEnglish.PDF>

- FOUCAULT, Michel. « Cours du 15 janvier 1975 au Collège de France » in *Les Anormaux*. Paris : Ed. Seuil/Gallimard coll. Hautes Etudes ; 1999, 218p.
- GASC Jean-Pierre. « *L'interprétation fonctionnelle de l'appareil musculo-squelettique de l'axe vertébral chez les serpents (reptilia)* » In *Mémoires du Muséum National d'Histoire Naturelle* série A, Zoologie TOME LXXXIII. Paris : Editions du Muséum ; 1974 , 182 p.
- GINIAUX. *Les chevaux m'ont dit*. Equilivre, Collection Cheval magazine 2003; 109p.
- GUILLARD, Yves. « *Torsion physiologique sur le quadrupède* » in *L'Ostéo4pattes* n°26, automne 2012, pp. 25-29.
- HEUSCHMANN, Gerd. *Dressage moderne : un jeu de massacre*. Paris: Ed. Belin; 2009, 125p.
- JELINEK, J ; KRYS, J. ; TEPLY, V. “*Present possibilities of objectified electronic measurement of equine locomotive potential in the Czech*”. In *Czech journal of animal science-UZPI*. Juillet 1999.
- KHEIN Alicia. *La radiographie du jarret chez le cheval. Conception d'un support pédagogique*. Université Claude Bernard Lyon I, juin 2011.
- LICART, Commandant. *Equitation raisonnée*. Paris : Edition Lavauzelle, 1989, 61p.
- LAUNOIS M., LAVEISSIERE G., FAYE B., KRISKA M. A. *Le dromadaire pédagogique*. Montpellier : Cirad; 2002, ISBN2-87614-528-6 ISSN : 1620-0705.
Le loup à crinière, 2004. On line :
<http://www.aguaraguazu.org.ar/ingles/status.htm>
Maned wolf survival plan, 1999.
<http://www.hrw.com/science/siscience/biology/animals/recovery/maned.html>
- MARCENAC, AUBLET, AUTHEVILLE. *Encyclopédie du cheval*. Paris : Ed. Maloine ; 1980, 252p.
- MAREY E. *Le mouvement. La machine animale. Locomotion terrestre et aérienne*. Paris: Ed. F. Alcan; 1894, 331p.
- MIRALLES, MARRERO. *Biomecánica clínica del aparato locomotor*. Barcelona: Ed. Masson; 1998.

- MONES A., OLAZARRI J., 1990. “*Confirmación de la existencia de ‘Chrysocyon brachyurus’ en el Uruguay*”. In *Comunicaciones Zoológicas del Museo de Historia Natural de Montevideo*, N°74; pp.1-6.
- MOTTA-JUNIOR J.C., TALAMONI S.A., LOMBARDI J.A., SIMOKOMAKI K., “*Diet of the maned wolf, ‘Chrysocyon brachyurus’*”. In *Central Brazil. Journal of Zoology*. N°240. 1996. London; pp.277-284.
- NGUYEN Fabienne. *Les chevaux ambleurs : Histoire et renaissance*. ENV Toulouse, 1991.
- PIGNOREL Mélanie. *Le loup à crinière*. Lyon I : Université Claude Bernard ; 2005, 118p.
- PRADIER Pierre, SAUTEL Marie-Odile. *Biomécanique du cheval, ostéopathie et rééducation équestre*. Paris : Editions Vigot; 2012, 127p.
- PREVOSTI F.J., BONOMO M., TONNI E.P., 2004. “*La distribución de ‘Chrysocyon Brachyurus’ durante el Holoceno en la Argentina : implicancias paleoambientales*” In *Journal Neotropical de Mammalogia*, N°11(1); pp27-43.
- RICHARD Daniel, ORSAL Didier. *Neurophysiologie. Organisation et fonctionnement du système nerveux*. Sciences Sup cours. Paris : Ed. Dunod; 2007, 540p. 3è édition.
- RUIZ. *Biomecánica de la columna vertebral y sus implantes*. Madrid: Ed. Ruiz, 1992.
- SZUNYOGHY Andras, FEHER György. *Grand cours d’anatomie artistique, homme, animaux, anatomie comparée*. Budapest : Ed. Konemann ; 1996, 603p.
- THOMPSON CW. *Initiation à l’anatomie du mouvement*. Cinésiologie. Paris : Ed. Vigot ; 1993, 170p.
- WEINECK Jürgen. *Biologie du sport*. Paris : Editions Vigot ; 1996, 788p.