

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	3
PREMIERE PARTIE : ANATOMIE DES REGIONS DE L'ENCOLURE ET DU TRONC	5
 1. RAPPEL D'ANATOMIE SUPERFICIELLE	7
 2. OSTEOLOGIE.....	8
21. Définition et caractères généraux des vertèbres	8
22. Vertèbres cervicales	9
23. Vertèbres thoraciques.....	14
24. Vertèbres lombaires.....	16
25. Sacrum.....	18
26. Les os coxaux.....	20
27. Vertèbres caudales	20
28. Conformation de la colonne vertébrale dans son ensemble	21
 3. LES ARTICULATIONS ET LES LIGAMENTS DE LA COLONNE VERTEBRALE.....	23
31. Disposition générale.....	23
311. Union des corps vertébraux	23
312. Union des arcs vertébraux	26
32. Dispositions particulières à certaines articulations intervertébrales.....	28
321. Articulation atlanto-occipitale	28
322. Articulation atlanto-axiale	29
323. Articulations intertransversaires	29
324. Articulations sacro-iliaques	30
 4. MYOLOGIE DE L'ENCOLURE ET DU TRONC.....	33
41. Les muscles de l'encolure.....	35
411. Les muscles de la région cervicale ventrale.....	36
412. Les muscles de la région cervicale dorsale	36
413. Les muscles juxtavertébraux de l'encolure	40
414. les muscles de la nuque	41
42. Les muscles du tronc.....	42
421. Les muscles pectoraux.....	42
422. Les muscles de la région du dos	43
423. Muscles de la paroi latéro-ventrale de l'abdomen	46
424. Muscles de la région lombo-iliaque.....	49
43. Les muscles de la ceinture et du membre thoracique	51
431. Les muscles de l'épaule	51
432. Les muscles du bras	52
44. Les muscles de la ceinture et du membre pelvien.....	52
441. Les muscles du bassin.....	52
442. Les muscles de la cuisse	53
DEUXIEME PARTIE : BIOMECANIQUE DE LA REGION AXIALE	55
 1. NOTIONS GENERALES DE BIOMECANIQUE	57
11. Définitions	58
111. Définition de la cinématique	58
112. Définition de la dynamique	58
12. Choix du référentiel.....	58
13. Définition du système étudié	59
131. Le chaînon corporel	60
132. Les lignes d'action musculaires	61
133. Les leviers	62
14. Constantes biomécaniques	63
141. Masse et longueur des segments corporels	63
142. Centre de gravité.....	64
143. Moment d'inertie et rayon de giration	64
15. Rappel des lois et principes régissant la dynamique	65
151. Principe de l'inertie (première loi de Newton)	65
152. Théorème de la quantité de mouvement (deuxième loi de Newton)	66
153. Théorème du moment cinétique	67
154. Principe d'Alembert ou principe de l'équilibre dynamique	67
155. Principe de l'action et de la réaction.....	68

156. Conservation de la quantité de mouvement	69
16. Bilan des forces s'exerçant sur une chaîne articulée	70
161. Les différentes catégories de forces.....	70
162. Forces extérieures et forces intérieures.....	70
163. Forces intersegmentaires	71
164. Etablissement d'un diagramme de corps libre	71
165. Equations générales du mouvement d'un chaînon.....	74
166. L'analyse dynamique inversée ; évolution des connaissances en biomécanique.	74
2. METHODES EXPERIMENTALES DE DETERMINATION DES CONSTANTES BIOMECHANIQUES.....	76
21. <i>Dissection</i>	76
22. <i>variables cinématiques</i>	76
221. Méthode de mesures directes.....	76
222. Méthode de mesures indirectes.....	77
223. Application à l'étude de la locomotion des équidés.....	78
23. <i>Variables dynamiques</i>	79
231. Plateaux de forces	79
232. Electromyographie (EMG)	79
3. ANALYSE BIOMECHANIQUE DE LA REGION AXIALE	82
31. <i>Rappel des bases biomécaniques appliquées à la région axiale</i>	82
311. Choix des repères d'espace et de temps.....	82
312. Définition du système et modélisation.....	89
313. Nature des mouvements.....	90
32. <i>Etudes in vitro</i>	92
321. Anatomie fonctionnelle	92
322. Expériences sur pièces de dissection	101
33. <i>Etudes in vivo</i>	114
331. Cinématique.....	114
332. Electromyographie	142
333. Plateaux de forces.....	152
34. <i>Synthèse de l'analyse biomécanique de la région axiale</i>	153
TROISIEME PARTIE : ACTION DU CAVALIER SUR LE DOS DE SON CHEVAL, APPLICATION DANS LES PRINCIPES L'ART EQUESTRE	155
1. LES PRINCIPES DE L'ART EQUESTRE	158
11. <i>Les grandes définitions</i>	158
111. L'équilibre	158
112. L'impulsion	161
113. La direction.....	162
114. La mise sur la main.....	162
12. <i>Les aides</i>	164
121. La position du cavalier - notion d'assiette.	165
122. Le poids du corps – l'assiette.....	166
123. Les jambes	166
124. Les mains.....	167
125. L'accord des aides – exemple de l'incurvation.....	168
2. ACTION DU CAVALIER SUR LA COLONNE VERTEBRALE DE SON CHEVAL, APPLICATION DANS LES PRINCIPES L'ART EQUESTRE.....	170
21. <i>Analyse biomécanique de l'impulsion et de « l'action impulsive »</i>	170
211. Définition de l'engagement et de la poussée des membres postérieurs aux différentes allures.....	170
212. Analyse de la poussée des postérieurs	171
213. Analyse de l'engagement des postérieurs	173
214. Corrélations entre les mouvements vertébraux, la poussée et l'engagement des membres postérieurs	174
215. Analyse de « l'action impulsive » du cavalier	175
22. <i>Analyse de la mise sur la main</i>	177
221. La flexion lombo-sacrale – équilibre vers les hanches.	177
222. La flexion cervicale haute – bascule de la nuque.....	179
223. influence de la position de l'encolure	180
224. hypothèse sur le mécanisme de la mise sur la main	188
23. <i>Mise sur la main et incurvation</i>	190
231. L'incurvation : les points clés de son mécanisme.....	190
232. Intérêt de l'incurvation pour la mise sur la main	192
CONCLUSION.....	194
BIBLIOGRAPHIE.....	195

INTRODUCTION

Depuis des siècles, le cheval est au service de l'homme.

L'Equitation actuelle est donc une discipline issue de l'héritage de plusieurs siècles d'observation, d'utilisation et d'étude des équidés.

Les scientifiques, et notamment les anatomistes, ont pendant de nombreuses années apporté leur contribution à la réflexion équestre en tentant d'éclaircir le fonctionnement de la machine animale.

Néanmoins, les cavaliers de génie n'ont pas attendu que la science leur livre tous les secrets de la mécanique de leurs montures pour tirer le meilleur d'elles. Ainsi, les principes des arts équestres modernes sont nés de la réflexion de ces virtuoses et souvent après le travail de toute une vie.

Parallèlement, la biomécanique est une discipline qui mêle phénomènes physiologiques et physiques afin d'appliquer les lois de la mécanique aux structures vivantes. Les connaissances qui en sont issues concernent donc de près les sportifs et par conséquent le cheval en tant qu'athlète.

Depuis maintenant plus de 25 ans, nous assistons par ailleurs à l'émergence de nouvelles méthodes d'investigation des êtres vivants telles que la cinématique et l'électromyographie et grâce auxquelles la biomécanique est en constante évolution.

Or, l'enseignement vétérinaire ne consacre guère de place aujourd'hui à la biomécanique et la physiologie du mouvement. Ainsi, il nous a semblé intéressant de faire en partie le point sur les connaissances acquises sur ce sujet et sur ses apports potentiels dans le domaine équestre.

De plus, les progrès techniques réalisés ces dernières années permettent désormais d'aborder la région axiale et donc d'envisager sous un angle nouveau le fonctionnement de la colonne vertébrale. Par conséquent, nous avons fait le choix d'illustrer l'approche de la biomécanique au travers de l'équitation en l'orientant vers le travail autour du dos du cheval, préoccupation centrale du cavalier.

Compte tenu que l'anatomie reste la base essentielle de toute étude biomécanique et afin que notre étude soit la plus complète et la plus compréhensible possible, il nous a semblé indispensable de présenter dans une première partie l'anatomie des régions de l'encolure et du tronc des équidés. Un soin tout particulier a par ailleurs été apporté lors de la rédaction de ce mémoire pour assurer un maximum de correspondance et de cohérence entre les parties

afin de faciliter les nombreux reports à des paragraphes ultérieurs qui sont proposés au lecteur au fur et à mesure de ce travail.

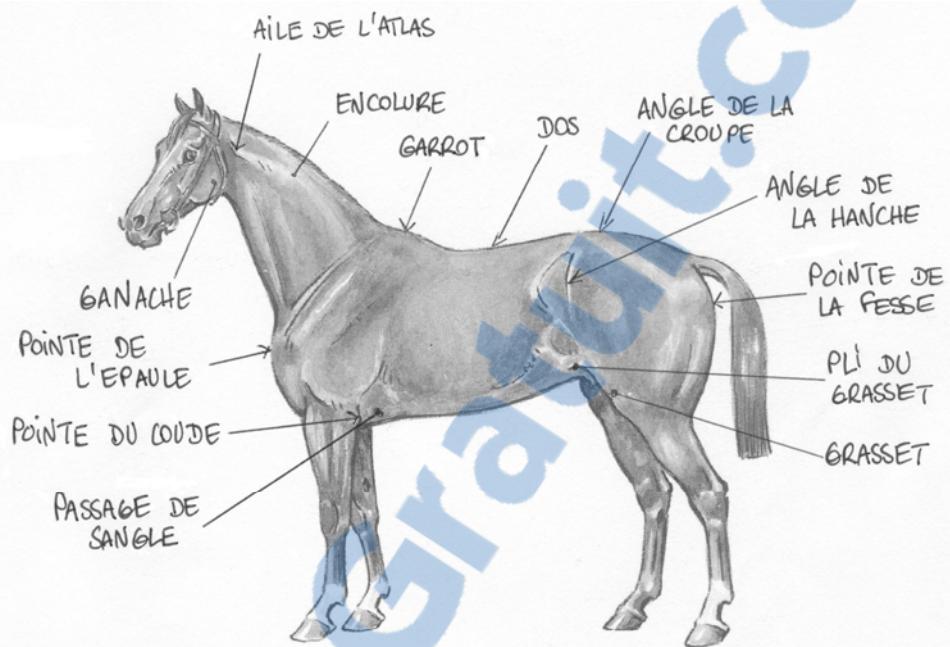
La seconde partie est consacrée à l'étude de la biomécanique et à son application à la région axiale. Ainsi, dans un premier temps nous nous contenterons de simplement présenter de manière générale cette discipline qui est encore en grande partie expérimentale. Puis nous tenterons d'aborder d'une manière la plus complète et la plus rigoureuse possible l'analyse de la biomécanique de la région axiale des équidés.

Enfin dans une troisième partie, nous essayerons de faire cohabiter les connaissances acquises dans les deux premières parties de ce mémoire avec les grands principes de l'art équestre. Pour cela, nous axerons notre analyse sur les mécanismes de la « mise sur la main » au travers de l'approche proposée dans les manuels de préparations des examens fédéraux. Le choix de limiter les références équestres est en fait volontaire. Il a pour but de rendre l'étude plus abordable pour le néophyte et surtout de conserver le caractère commun à toute une population de cavaliers des sensations abordées.

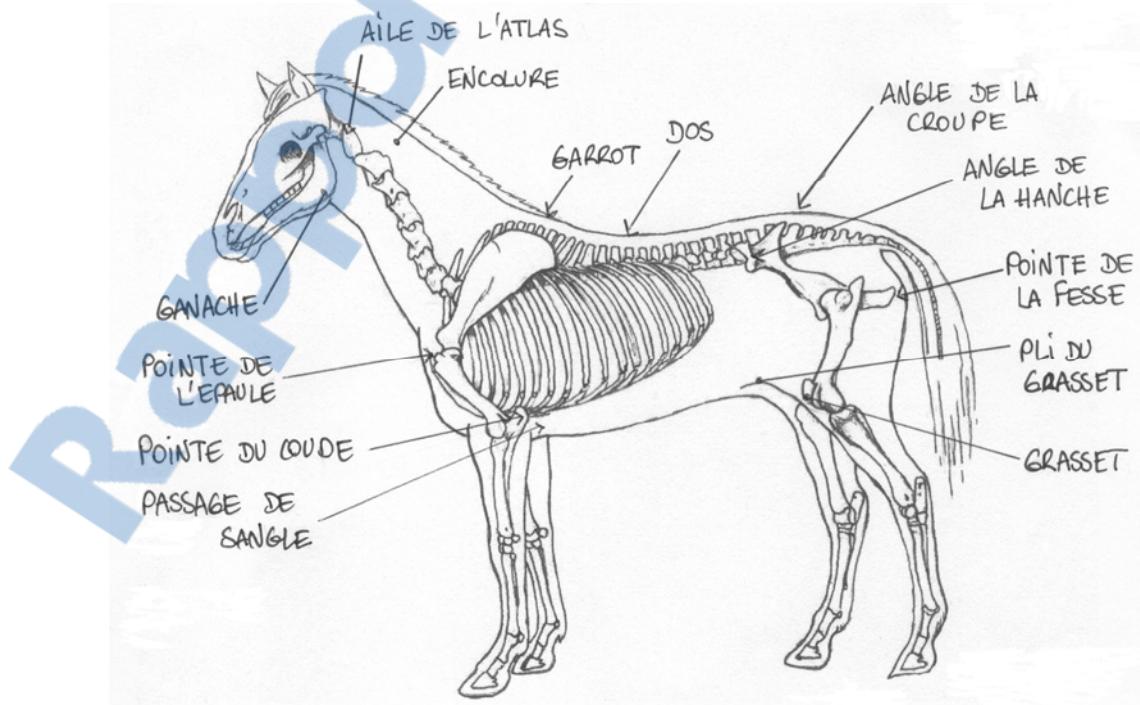
A la lumière de cette étude nous espérons faire ressortir la nécessité de rétablir la collaboration perdue entre les cavaliers et les scientifiques par l'intermédiaire des vétérinaires équins et de la mise en place d'une véritable médecine au service du sportif.

PREMIERE PARTIE : ANATOMIE
DES REGIONS DE L'ENCOLURE ET
DU TRONC

1. RAPPEL D'ANATOMIE SUPERFICIELLE



(Dessin extrait du manuel officiel de préparation aux examens fédéraux d'équitation. Tome 2.
Les examens d'argent. Edition Lavauzelle, 1988.)



(adapté d'après Barone)

2. OSTELOGIE

N.B. L'ensemble des informations apportées dans cette partie provient de l'œuvre de R. Barone, Anatomie comparée des mammifères domestiques. (Tome 1 : Ostéologie.)

21. DEFINITION ET CARACTERES GENERAUX DES VERTEBRES

La colonne vertébrale est constituée d'un assemblage d'os courts, tubéreux et impairs : les vertèbres.

C'est une tige solide et flexible, creusée dans sa longueur par le canal vertébral, qui abrite la moelle épinière et ses enveloppes. Elle est reliée au crâne par l'articulation atlanto-occipitale, à l'os coxal par les articulations sacro-iliaques et elle s'articule avec les côtes dans la région thoracique.

Chaque vertèbre est symétrique par rapport au plan médian et peut être décrite selon le schéma suivant : un corps ventral cylindroïde recouvert d'un arc dorsal délimitant le foramen vertébral.

Les différences morphologiques observées entre les différentes vertèbres leur confèrent certaines aptitudes fonctionnelles et permettent de subdiviser la colonne vertébrale en cinq régions : cervicale, thoracique, lombaire, sacrale et coccygienne.

Chez le cheval, elle se compose de 7 vertèbres cervicales, 18 vertèbres thoraciques, 6 vertèbres lombaires, 5 vertèbres sacrales et 17 à 21 vertèbres caudales.

Les variations dans le nombre de vertèbres sont fréquentes. Dans une étude portant sur un échantillon de 36 pur sang, il a été rapporté que seulement 61% des individus avaient 6 vertèbres lombaires et 5 sacrales. (Haussler et coll. 1997)

Cependant, l'augmentation ou la diminution du nombre de vertèbres dans une région est en général compensée par la variation inverse dans une région adjacente avec une tendance marquée à avoir un total de 11 vertèbres lombo-sacrées. (Stecher 1962)

Ainsi dans l'étude précédemment citée, les 41% de chevaux qui présentaient une variation avaient 5 vertèbres lombaires et 6 sacrales.

22. VERTEBRES CERVICALES

Les vertèbres cervicales sont au nombre de sept, elles constituent la base osseuse de la région de l'encolure.

L'atlas (la première) qui s'articule à l'os occiput présente de ce fait des caractères très particuliers, auxquels l'axis (la deuxième) s'adapte à son tour.

Les vertèbres cervicales III, IV et V se ressemblent beaucoup, leurs caractères définissent ceux de la région.

CONFORMATION DE L'ATLAS ET DE L'AXIS

L'ATLAS, ou la première vertèbre cervicale, s'articule crânialement aux condyles de l'os occipital et caudalement à l'axis. Elle diffère de toutes les autres vertèbres par des caractères très particuliers : l'absence de corps qui est remplacé par un arc ventral, le développement considérable de ses processus transverses (aile de l'atlas), la vaste dimension du canal vertébral.

La face dorsale de l'**arc ventral** forme le plancher du foramen vertébral, elle est en partie occupée par le **fovea dentis** ; surface concave et revêtue de cartilage pour répondre à la dent de l'axis. La face ventrale présente notamment le **tubercule ventral** qui est destiné à des insertions musculaires, dont notamment celle du muscle long du cou.

La face ventrale de l'**arc dorsal** forme le plafond du foramen vertébral, sa face dorsale présente un relief rugueux, vestige du processus épineux ; le **tubercule dorsal** de l'atlas.

Les **ailes de l'atlas** correspondent aux processus transverses. Elles se présentent comme de larges lames bordées d'une lèvre plus ou moins rugueuse, creusées à leurs faces ventrales par une fosse atlaidienne et perforées crânialement par le foramen alaire et caudalement par le foramen transversaire.

Les **surfaces articulaires crâniales** sont disposées de part et d'autre du foramen vertébral, elles répondent à chacun des condyles occipitaux par deux larges et profondes facettes articulaires revêtues de cartilage.

Les surfaces articulaires caudales répondent aux extensions latérales de la surface articulaire crâniale de l'axis. Elles sont légèrement convexes et obliques, séparées l'une de l'autre par une large échancrure rugueuse.

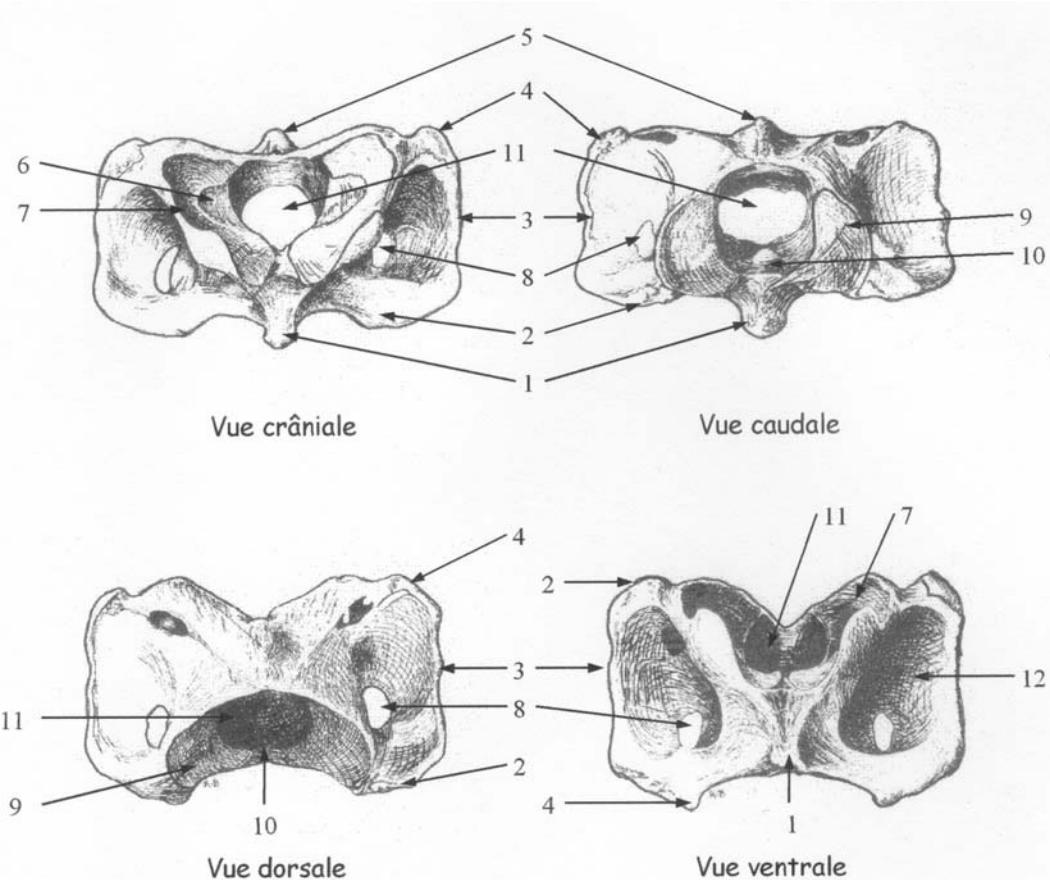
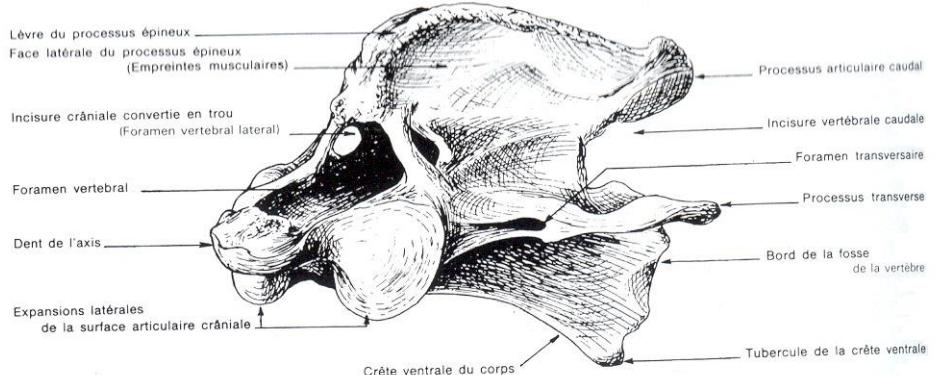
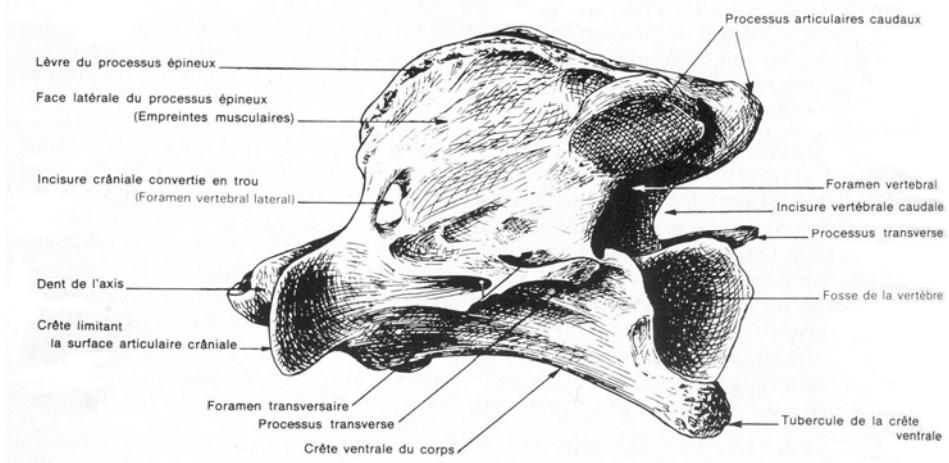


Figure n°1. L'atlas (première vertèbre cervicale)
(Barone R.)

1. tubercule ventral de l'arc ventral
2. tubercule caudal de l'aile de l'atlas
3. masse latérale de l'aile de l'atlas
4. tubercule crânial de l'aile de l'atlas
5. tubercule ventral de l'aile de l'atlas
6. arrière fond de la cavité articulaire
7. cavité articulaire pour le condyle occipital
8. foramen transversaire
9. surface articulaire caudale
10. *fovea dentis*
11. foramen vertébrale
12. fosse altoïdienne



Vue crano-latérale gauche.



Vue caudo-latérale gauche

Figure n°2. L'axis (deuxième vertèbre cervicale)
(Barone R.)

L'AXIS, ou la deuxième vertèbre cervicale présente comme toutes les autres vertèbres un corps et un arc. Cependant, ces deux formations sont modifiées à leur partie crâniale.

Le **corps** présente à sa face ventrale une **crête** tranchante terminée caudalement par un fort tubercule.

La tête vertébrale est remplacée par un puissant pivot de forme hémisphérique qui s'articule avec la *fovea dentis* de l'atlas : c'est la **dent de l'axis**. La face ventrale de ce processus est convexe et recouverte de cartilage articulaire en réponse à la *fovea dentis*, sa face dorsale est creusée d'une gouttière dont la surface rugueuse reçoit de puissantes attaches ligamentaires. La surface articulaire ventrale de la dent est en continuité latéralement avec des

expansions articulaires planiformes destinées à répondre aux surfaces articulaires caudales de l'atlas.

La fosse vertébrale est profonde comme celles des autres vertèbres cervicales.

L'arc porte un **processus épineux** haut et allongé dans le sens crânio-caudal avec un bord dorsal épais qui bifurque caudalement pour se prolonger par une forte crête sur chaque processus articulaire caudal.

Les **processus transverses** sont simples et relativement grêles, les **processus articulaires caudaux** sont disposés de façon identique à ceux des autres vertèbres cervicales.

CONFORMATION DES VERTEBRES CERVICALES III A VII

Chez le cheval, elles sont longues et fortes.

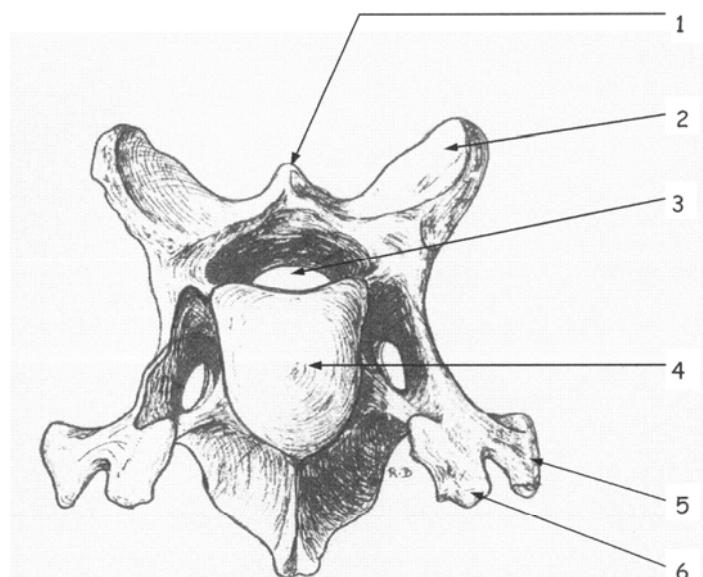
Le **corps** est pourvu d'une crête ventrale tranchante, terminée par un tubercule de plus en plus volumineux de la troisième à cinquième. La tête est saillante et nettement convexe, la fosse vertébrale est profonde et oblique ventro-caudalement.

Les **processus épineux** sont peu développés, les **processus transverses** sont divisés en deux tubercules ; l'un dorso-caudal et l'autre crano-ventral.

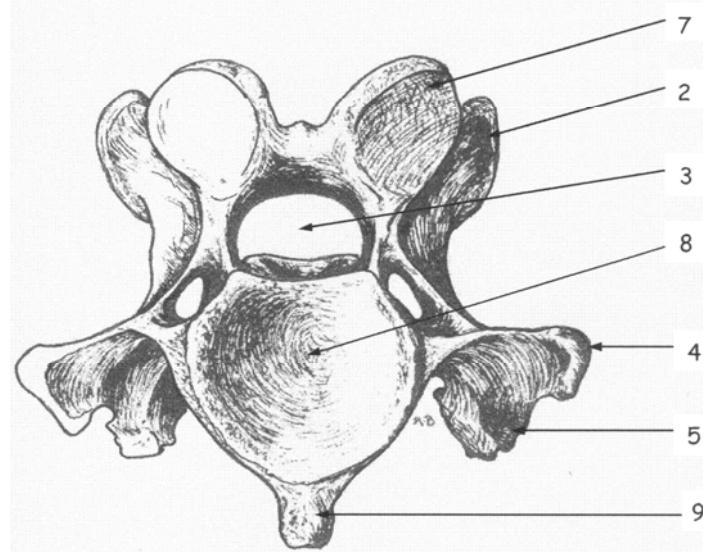
Les **processus articulaires** sont larges et forts avec des surfaces articulaires planiformes, obliques vers le plan médian et ils présentent une orientation radiale.

Sur les vertèbres cervicales VI et VII on observe notamment un raccourcissement du corps, la disparition de la crête ventrale et l'accentuation des processus épineux.

Enfin, c'est sur la septième vertèbre cervicale qu'apparaissent les premières *fovea costales*.



Vue crâniale



Vue caudale

Figure n°3. Cinquième vertèbre cervicale.
(Barone R.)

- | | |
|---|--|
| 1. processus épineux | 6. tubercule ventral du tubercule transverse |
| 2. processus articulaire crânial | 7. processus articulaire caudal |
| 3. foramen vertébral | 8. fosse vertébrale |
| 4. tête vertébrale | 9. tubercule caudal de la crête ventrale |
| 5. tubercule dorsal du tubercule transverse | |

23. VERTEBRES THORACIQUES

Les vertèbres thoraciques forment l'axe de la paroi dorsale du thorax.

Elles sont caractérisées par leurs articulations avec les côtes.

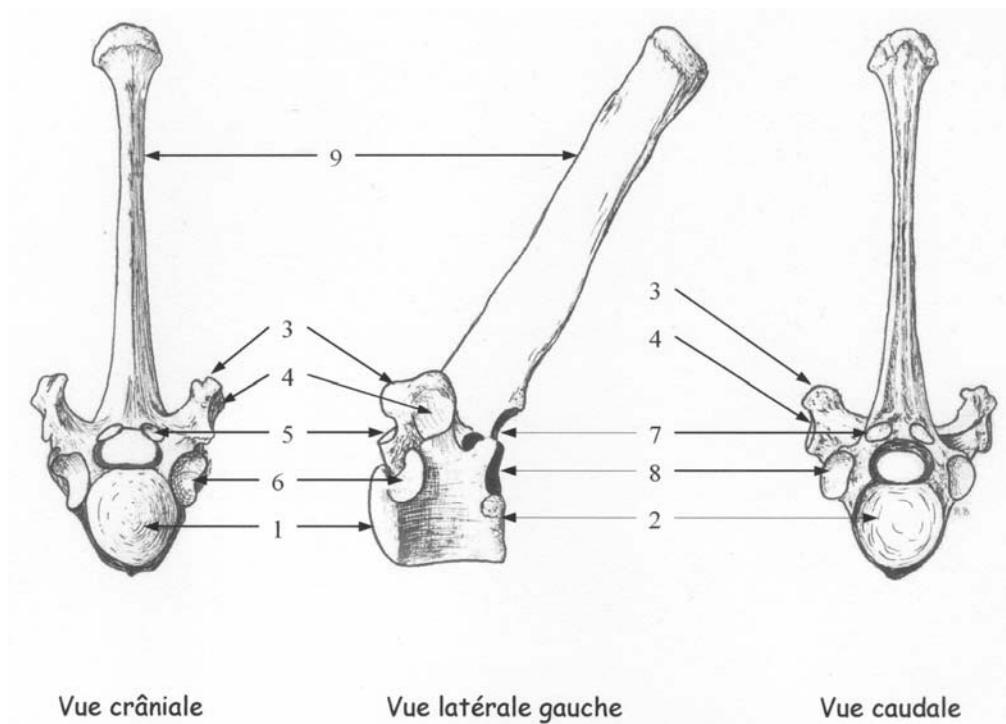


Figure n°4. Cinquième vertèbre thoracique.
(Barone R.)

- | | |
|---|---|
| 1. tête vertébrale | 7. processus articulaire caudal |
| 2. fosse vertébrale | 8. fossette articulaire pour la tête de la sixième côte |
| 3. processus transverse | 9. processus épineux |
| 4. fovea costale | 10. foramen vertébral |
| 5. processus articulaire crânial | |
| 6. fossette articulaire pour la tête de la cinquième côte | |

CONFORMATION

Le corps est court, la tête est moins convexe et la fosse moins concave que dans les vertèbres cervicales.

Le corps porte les *fovea costales*. Les cupules costales qui reçoivent les têtes des côtes résultent de la juxtaposition des *fovea costales* de deux corps vertébraux adjacents. Au niveau des trois ou quatre dernières vertèbres thoraciques ils sont pourvus d'une crête ventrale qui reçoit les insertions des piliers du diaphragme. (Haussler et coll. 1997)

Les **processus épineux** sont hauts larges et étroits, crânialement ils forment la région du garrot (de T2 à T12), le troisième et le quatrième étant les plus hauts. Leur orientation d'abord dorso-caudale s'inverse au niveau de la **vertèbre anticlinale**. En fonction des auteurs, cette dernière est située entre la treizième et la seizeième. (Barone, Denoix 1999a, Haussler 1999a)

Les **processus transverses** sont courts, épais et tubéreux. Ils portent les foveas costales transversaires et sont pourvus de **processus mamillaires** dans les trois ou quatre dernières vertèbres thoraciques.

Les **processus articulaires** situés entre la première et la deuxième vertèbres thoraciques, ressemblent à ceux des vertèbres cervicales ; ils sont larges, planiformes, orientés radialement et vers l'intérieur (Townsend et Leach 1984).

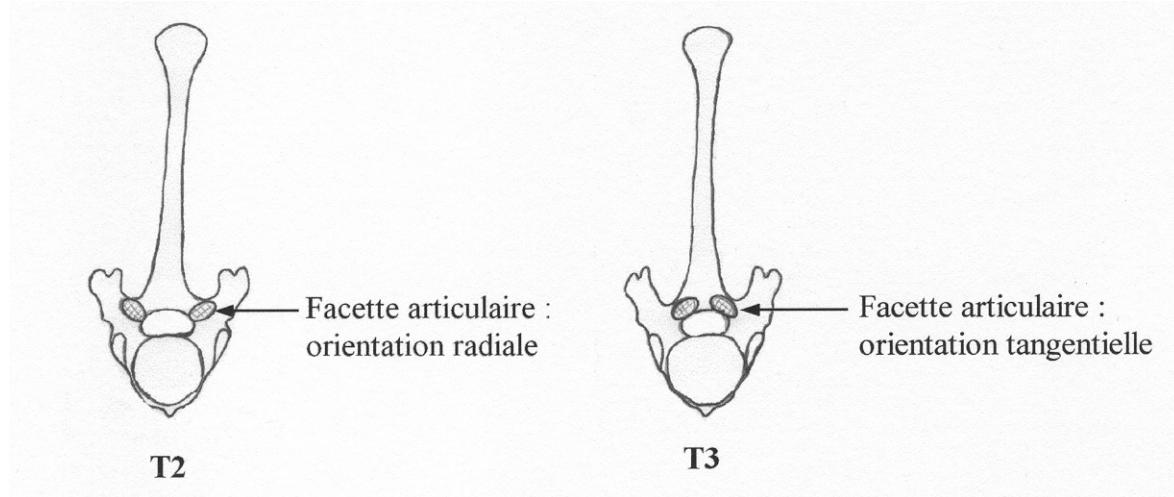


Figure n°5. Schéma de la 2^{ième} et de la 3^{ième} vertèbre thoracique (vue crâniale) illustrant l'orientation des facettes articulaires dans le plan transversal.

(Townsend et Leach 1984)

A partir de la deuxième articulation thoracique (T2-T3), les processus articulaires sont plus petits et toujours planiformes. Ils se rapprochent du plan médian tout en prenant une orientation tangentielle et quasi horizontale (cf. figure n°5). Caudalement, les surfaces articulaires se creusent progressivement, pour devenir carrément engainantes avec une orientation plus verticale aux

environs de T16-T17. On observe alors à ce niveau la fusion entre les processus articulaires et mamillaires (Townsend et Leach 1984).

24. VERTEBRES LOMBAIRES

Les vertèbres lombaires donnent la base de la région du rein.

CONFORMATION

Le **corps** plus long et plus large que celui des vertèbres thoraciques présente une tête et une fosse quasi planiformes. Les trois premiers corps sont pourvus d'une nette crête ventrale qui reçoit les insertions des piliers du diaphragme, elle est cependant complètement absente sur le dernier. (Haussler et coll. 1997)

Les **processus épineux** sont larges et plats mais leur hauteur n'excède pas celles des dernières vertèbres thoraciques. Ils diminuent de largeur et leur sommet s'amincit de la première à la dernière.

Les **processus mamillaires** sont élevés, saillants en direction crânio-dorsale.

Les **processus transverses** sont caractéristiques ; larges, aplatis dorso-ventralement et très allongés, ils forment une véritable « voûte lombaire ». Ils augmentent de longueur du premier au troisième puis diminuent jusqu'au sixième. L'orientation des deux premiers est caudale, celle des deux derniers est au contraire crâniale. Chez les équidés on observe entre ces processus des **articulations intertransversaires**, de manière constante entre L5 et L6 et entre L6 et les ailes du sacrum, de manière variable en fonction des individus entre L4 et L5. (Stecher 1962, Townsend et Leach 1984, Haussler et coll. 1997)

Les **processus articulaires** sont très engainants ; concaves pour les processus craniaux et convexes pour les caudaux. Leur orientation est radiale et quasi verticale.

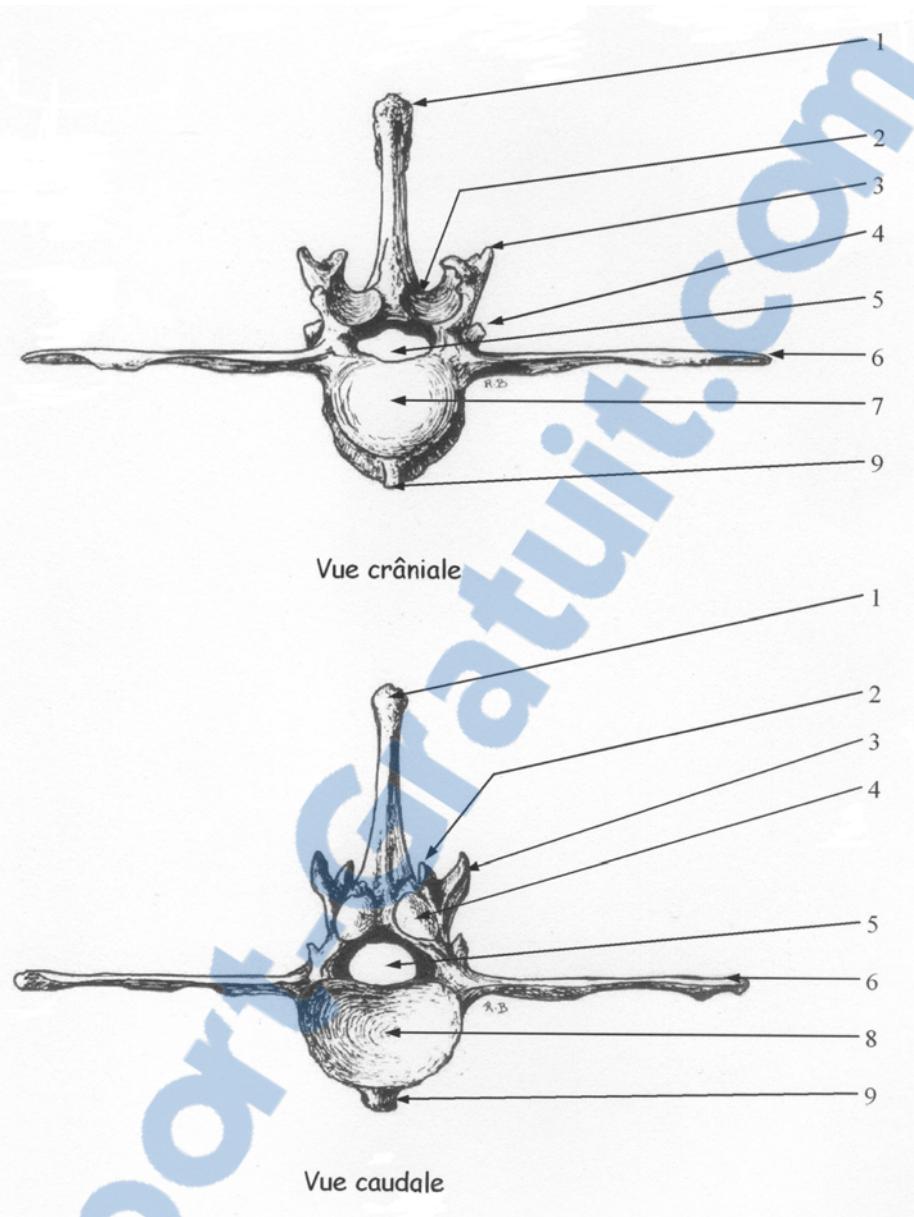


Figure n°6. Troisième vertèbre lombaire.
(Barone R.)

- | | |
|--|--|
| 1. processus épineux
2. processus articulaire
3. processus mamillaire
4. processus articulaire caudal
5. foramen vertébral | 6. processus transverse
7. tête vertébrale
8. fosse vertébrale
9. crête ventrale du corps vertébral |
|--|--|

25. SACRUM

L'os sacrum résulte de la fusion des vertèbres sacrales. Chez le cheval la fusion s'opère au niveau des corps, des processus articulaires et transverses et de la base des processus épineux.

L'os sacrum s'unit latéralement aux os coxaux par les articulations sacroiliaques ; l'ensemble sacrum-os coxaux forme le bassin.

CONFORMATION

Aplati dorso-cranialement l'os sacrum se présente sous une forme triangulaire dont la base s'articule avec la dernière vertèbre lombaire et le sommet encore appelé apex avec la première vertèbre caudale.

La tête du **corps** de la première vertèbre sacrale est peu saillante et allongée transversalement en forme d'ellipse. L'union de cette tête avec la fosse de la dernière vertèbre lombaire se fait par l'intermédiaire d'un disque fibrocartilagineux très épais ; elle forme un angle saillant du côté ventral : le **promontoire**.

La fosse de la dernière vertèbre sacrale est presque plane.

La face pelvienne forme en partie le plafond de la cavité pelvienne, elle est légèrement concave et on y observe les foramens sacraux pelviens.

La face dorsale présente sur le plan médian une série des processus épineux entre lesquels émergent les foramens sacraux dorsaux. Chez le cheval les **processus épineux** ne sont soudés que par leur base et restent presque entièrement séparés ; le premier est grêle et son sommet est mince, les suivants sont plus épais et forts avec un sommet renflé et rugueux.

Chaque bord correspond à une partie latérale qui résulte de la fusion des **processus transverses** entre eux. Les premiers processus transverses sont beaucoup plus larges et plus épais que les autres, ils forment les ailes de l'os sacrum, dont la face dorsale présente une surface articulaire planiforme et allongée (nommée la surface auriculaire) qui répond à une facette similaire de l'os ilium, l'ensemble formant l'articulation sacro-iliaque. Sur les bords crâniaux des ailes de l'os sacrum on observe de larges facettes planes et de forme elliptique qui répondent aux processus transverses de la dernière vertèbre lombaire.

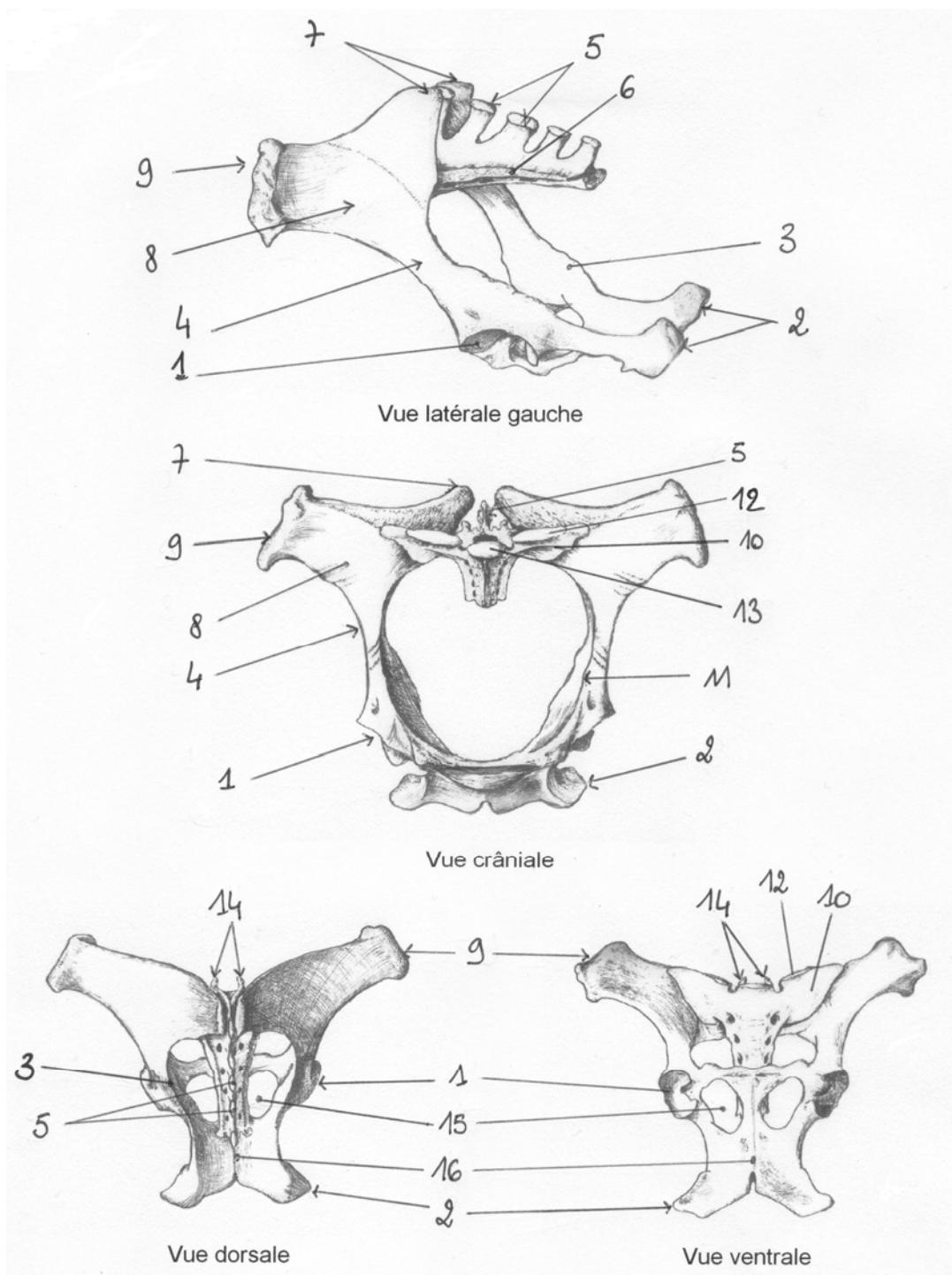


Figure n° 7. Bassin osseux. (Barone R.)

- | | |
|---------------------------------------|--|
| 1. acétabulum | 10. aile de l'os sacrum |
| 2. tubérosité ischiatique | 11. tubercule du muscle petit psoas |
| 3. épine sciatiqe | 12. surface articulaire transverse du sacrum |
| 4. col de l'ilium | 13. corps de la 1 ^{ière} vertèbre sacrale |
| 5. bord de l'os sacrum | 14. processus articulaire de la 1 ^{ière} vertèbre sacrale |
| 6. épine sacrale | 15. foramen obturé |
| 7. tuber sacrale (angle de la croupe) | 16. symphyse pelvienne |
| 8. aile de l'ilium | |
| 9. épine iliaque (angle de la hanche) | |

Les processus articulaires crâniaux de la première vertèbre sacrale présentent la même morphologie que ceux des vertèbres lombaires. Les processus articulaires caudaux de la dernière vertèbre sont quasi absents.

26. LES OS COXAUX

L'os coxal est composé de trois pièces ; l'ilium, l'ischium et le pubis qui convergent et fusionnent sur la centre articulaire ou acétabulum destiné à donner appui au fémur.

Les deux os coxaux s'unissent sur une ligne ventro médiale initialement par une symphyse qui tend à être ossifiée. Chez les équidés, la symphyse pelvienne est ischio-pubienne, elle est transformée en synostose de façon relativement précoce.

Enfin, ils s'articulent avec la colonne vertébrale par les articulations sacroiliaques.

Le bassin (ou région pelvienne) est composé par l'union des deux os coxaux et du sacrum.

27. VERTEBRES CAUDALES

Les vertèbres caudales constituent la base osseuse de la queue.
Chez le cheval, on en compte en principe entre 17 et 20.
Elles présentent une simplification progressive de leur forme.

CONFORMATION

Le corps est long et cylindroïde. Sa surface articulaire caudale n'est pas concave mais convexe ; ces vertèbres sont donc convexes à leurs deux extrémités.

Les arcs se réduisent de façon progressive ainsi les dernières vertèbres ne sont formées que d'un corps.

Seule la première vertèbre est complète et possède des processus articulaires crâniaux.

La fusion de la première vertèbre caudale avec de sacrum est fréquente surtout chez les chevaux âgés. (Stecher et Goss 1961)

28. CONFORMATION DE LA COLONNE VERTEbraLE DANS SON ENSEMBLE

PROPORTIONS DES DIFFERENTES REGIONS

D'après Barone, si on ramène à la valeur 100 la longueur mesurée du bord crânial de l'atlas à l'articulation sacro-coccigienne (la queue étant éliminée en raison de sa variabilité), on trouve approximativement pour chaque région les pourcentages suivants :

- ⇒ Région cervicale 32%
- ⇒ Région thoracique 43%
- ⇒ Région lombaire 15%
- ⇒ Sacrum 10%

La longueur importante de l'encolure associée avec un segment lombaire relativement court peuvent être mis en relation avec l'adaptation à la course de cette espèce.

DIRECTION ET COURBURES

La colonne vertébrale décrit dans son ensemble une série de courbures, dont la disposition est à peu près constante chez tous les mammifères. (Barone)

Chez le cheval la colonne vertébrale se présente la manière suivante ; (Denoix 1999c) (Cf. figure n°8)

- ⇒ **La courbure nuchale**, convexité dorsale s'étendant de C0 à C3,
- ⇒ **La courbure cervico-thoracique**, convexité ventrale s'étendant de C4 à T4.
- ⇒ **Le segment thoraco-lombaire** est pratiquement rectiligne, généralement il présente une légère convexité dorsale sauf chez les chevaux ensellés (c'est à dire souffrant d'une lordose) qui sont affectés d'une convexité ventrale à ce niveau.
- ⇒ **La courbure lombo-sacrée ou angle du promontoire**, angle de 15 à 25° saillant du côté ventral formé par l'union de la fosse de la sixième vertèbre lombaire et la tête du sacrum.
- ⇒ **La courbure sacrale** à convexité dorsale.

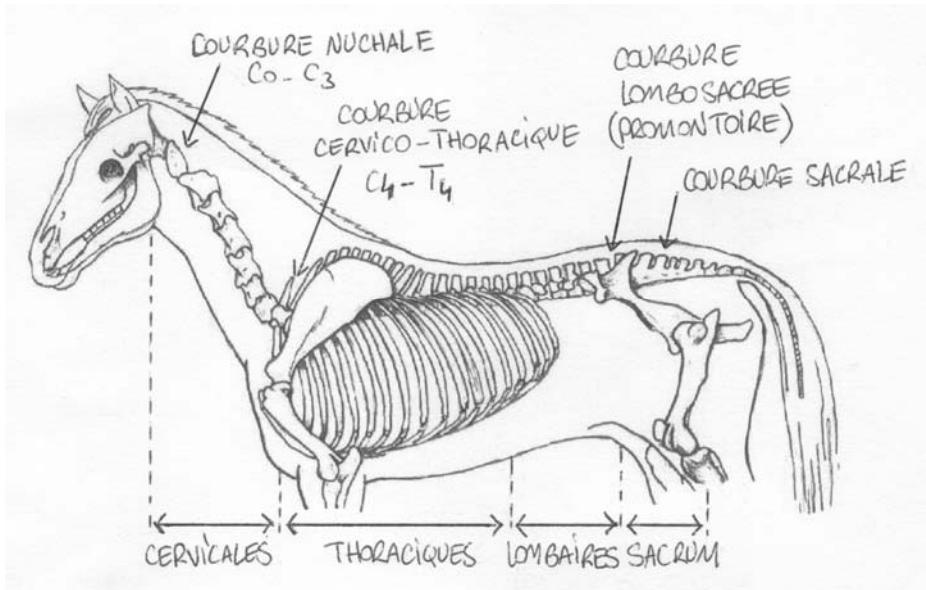


Figure n°8. Courbures de la colonne vertébrale dans son ensemble.

(Adapté d'après Denoix 1999c)

Parallèlement à ces courbures l'allure générale de la colonne vertébrale est aussi dessinée par l'orientation des processus épineux.

L'orientation des processus épineux est dorso-caudale de T1 à T13 environ, puis elle s'inverse au niveau de la vertèbre antéclinale pour devenir dorso-crâniale jusqu'à L6. Les processus épineux du sacrum sont orientés dorso-caudalement.

Au niveau de l'articulation lombo-sacrée, on observe donc une divergence des processus épineux qui crée un large espace inter-épineux.

Chez certains individus, le processus épineux de L6 est orienté verticalement ou dorso caudalement. L'espace inter épineux se trouve alors réduit ce qui pourrait affecter la biomécanique locale. (Denoix 1992a, Haussler et coll. 1997)

[Cf. 2^{ème} partie, § 3213, figure n°38]

3. LES ARTICULATIONS ET LES LIGAMENTS DE LA COLONNE VERTEBRALE

Un aspect souvent négligé de la colonne vertébrale est le nombre important d'articulations présentes. En moyenne, l'ensemble de la colonne comporte 137 articulations synoviales (13 en région cervicale, 104 en région thoracique, 16 en région lombaire et 4 dans le sacrum) et 48 articulations fibrocartilagineuses, ce qui amène un total d'environ 185 articulations séparées. (Haussler 1999a)

Ces complexes articulaires sont évidemment renforcés par les ligaments et les muscles.

31. DISPOSITION GENERALE

Cf. figure n°9.

311. UNION DES CORPS VERTEBRAUX

L'articulation qui unit les corps vertébraux entre eux est une symphyse. Les surfaces articulaires sont les fosses et les têtes vertébrales, les disques fibrocartilagineux ou disques intervertébraux qui les unissent fortement sont renforcés par les ligaments longitudinaux ventraux et dorsaux.

Ce type d'articulation ne permet que des déplacements de faible amplitude. Ces mouvements qui allient solidité et souplesse, peuvent, dans le cas de la colonne vertébrale, s'ajouter à ceux des articulations similaires pour donner à une région une mobilité apparente. (Baronne tome 2 p13)

3111. LE DISQUE INTERVERTEBRAL

Il s'agit d'une lame fibreuse qui adhère fortement aux cartilages articulaires des corps vertébraux.

Il est épais en région cervicale jusqu' à la deuxième articulation thoracique et au niveau de l'articulation lombo-sacrée où il participe à la formation de l'angle du promontoire. Il est mince dans la région thoraco lombaire. (Townsend et Leach 1984) (Cf. tableau n°1)

Sa partie périphérique constitue l'*annulus fibrosus*, sa consistance est ferme mais élastique. Sa partie centrale ou *nucleus pulposus* est remplacée chez le cheval par une formation fibro-élastique qui diffère de l'*annulus fibrosus* par une moindre fermeté. (Denoix 1999c)

L'épaisseur du disque serait un facteur contribuant à la mobilité vertébrale, la mobilité augmentant avec l'épaisseur. (Townsend et Leach 1984, Haussler 1999a)

Complexe articulaire	Epaisseur du disque en mm	Complexe articulaire	Epaisseur du disque en mm
T1-T2	5.9	T13-T14	2.9
T3-T3	3.4	T14-T15	2.3
T3-T4	2.9	T15-T16	2.3
T4-T5	2.8	T16-T17	2.4
T5-T6	2.6	T17-T18	2.4
T6-T7	2.4	T18-L1	2.7
T7-T8	2.0	L1-L2	2.5
T8-T9	2.4	L2-L3	2.6
T9-T10	2.3	L3-L4	2.6
T10-T11	2.4	L4-L5	2.6
T11-T12	2.4	L5-L6	1.9
T12-T13	2.4	L6-S1	3.6

Tableau n°1. Epaisseur moyenne des disques intervertébraux.

Calculs réalisés d'après des relevés provenant de quatre colonnes différentes
(D'après Townsend et Leach 1984)

3112. LE LIGAMENT LONGITUDINAL VENTRAL

Cordon blanc et fibreux situé à la face ventrale des corps vertébraux auxquels il adhère intimement ainsi qu'à la marge correspondante des disques intervertébraux.

Chez le cheval, il est absent de l'axis jusqu' à T7, le ligament atlanto-axial ventral en étant la seule partie présente dans la région cervicale.

Large et mince dans la région thoracique, il devient plus étroit, plus épais et puissant dans la région lombaire. En regard de la troisième et la quatrième vertèbre lombaire il est renforcé par les insertions tendineuses des piliers du

diaphragme. Il se termine par une insertion rayonnée à la face ventrale du sacrum.

3113. LE LIGAMENT LONGITUDINAL DORSAL

Il s'agit d'un mince ruban fibreux continu de l'axis au sacrum.

Au niveau de l'axis il forme le ligament longitudinal de la dent de l'axis.

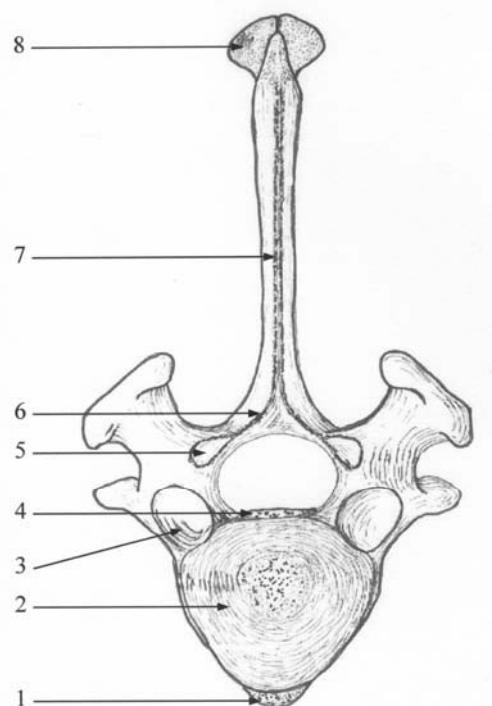


Figure n°9. Moyen d'union des vertèbres.

Vertèbre thoracique vue crâniale, insertions des divers moyens d'union.
(adapté d'après Barone R.)

- | | |
|---------------------------------|----------------------------------|
| 1. ligament longitudinal dorsal | 5. processus articulaire crânial |
| 2. disque intervertébral | 6. ligament inter-lamellaire |
| 3. cupule costale | 7. ligament inter-épineux |
| 4. ligament longitudinal dorsal | 8. ligament supra-épineux |

312. UNION DES ARCS VERTEBRAUX

Chaque arc vertébral est uni à celui qui précède et à celui qui suit par une double articulation synoviale entourée d'une mince capsule articulaire.

Les surfaces articulaires sont portées par les processus articulaires. Les processus caudaux viennent se placer dorsalement aux processus crâniaux. Leur conformation est variable selon les régions.

En association à ces articulations, de multiples ligaments viennent solidariser les lames vertébrales et les processus épineux.

3121. LES LIGAMENTS INTER-LAMELLAIRES

Ces ligaments ferment l'espace compris entre deux lames vertébrales successives. Ils sont en rapport avec les muscles spinaux dorsalement et leur face ventrale ferme le canal vertébral.

Ils sont parfois appelés « ligaments jaunes » car ils sont formés de tissu élastique de cette couleur, sauf dans la région thoraco lombaire où ils sont blancs et fibreux.

3122. LES LIGAMENTS INTER-EPINEUX

Ces ligaments relient les processus épineux successifs.

Dans la région cervicale, ils sont élastiques, allongés et peu élevés.

Dans la région thoracique, ils sont au contraire fibreux, courts et étendus sur l'ensemble de la hauteur des processus. Cependant, l'orientation très oblique de leurs fibres ne s'oppose pas aux mouvements de flexion-extension. (Denoix 1999c)

Il est lâche au niveau de l'articulation lombosacrale. (Jeffcott et Dalin 1980a, Denoix 1986)

3123. LE LIGAMENT SUPRA-EPINEUX

Il s'agit d'un ligament fort qui s'insère sur le sommet des processus épineux. Sa disposition et sa structure diffèrent beaucoup entre la région cervicale et le reste de la colonne vertébrale. De ce fait, sa partie cervicale prend le nom de ligament nuchal, l'appellation de ligament supra-épineux étant réservée à sa partie thoraco-lombo-sacrale.

Il s'étend donc du sommet du garrot soit de la quatrième vertèbre thoracique jusqu'aux premières vertèbres caudales où sa structure est fibreuse et inextensible. Crânialement, sa structure se modifie peu à peu pour se confondre à celle du ligament nuchal qui est lui très élastique.

Dans la région thoraco lombaire il reçoit l'insertion du fascia thoraco-lombaire et des aponévroses des muscles trapèzes, grand dorsal et dentelés dorsaux du thorax. Dans la région sacrale, il se confond avec le fascia glutéal et le ligament sacro-iliaque dorsal.

Il est absent au niveau de l'articulation lombosacrale. (Jeffcott et Dalin 1980a, Denoix 1986)

3124. LE LIGAMENT NUCHAL

C'est une formation complexe qui prolonge le ligament supra-épineux dans la région cervicale et qui joue un rôle important dans le soutènement de la tête et dans la mécanique du dos et de l'encolure. Ainsi il est particulièrement développé et très élastique chez les équidés en réponse à la masse céphalique et à l'importance du balancier cervico-céphalique dans cette espèce. En effet, il est très riche en élastine (80% de la matière sèche), mais ses propriétés en tant que tissus sont différentes de l'élastine purifiée. L'étude en microscopie électronique de ligaments nuchal de bovins conclut qu'il s'agit d'un matériau composé de fibres de collagène (rigides) immergées dans une matrice amorphe (Gellman et Bertram 2002a).

Sur le plan macroscopique, c'est une structure paire et symétrique qui se rejoint sur la ligne médiale dorsale. Considéré dans son ensemble il est divisible en deux parties distinctes : **une corde et une lame**.

La **corde** du ligament nuchal est étendue de la protubérance occipitale externe au sommet des processus épineux du garrot où elle se prolonge par le ligament supra-épineux qui caudalement à la quatrième vertèbre thoracique, devient de plus en plus fibreux et inextensible (Gellman et Bertram 2002a).

La **lame** du ligament nuchal est une large cloison médiane tendue entre la corde avec laquelle elle est continue et les processus épineux des vertèbres cervicales

et des trois premières thoraciques. Ses insertions les plus importantes se trouvent sur l'axis, la troisième et la quatrième vertèbres cervicales crânialement et la deuxième et la troisième vertèbres thoraciques caudalement (Gelmann et Bertram 2002a).

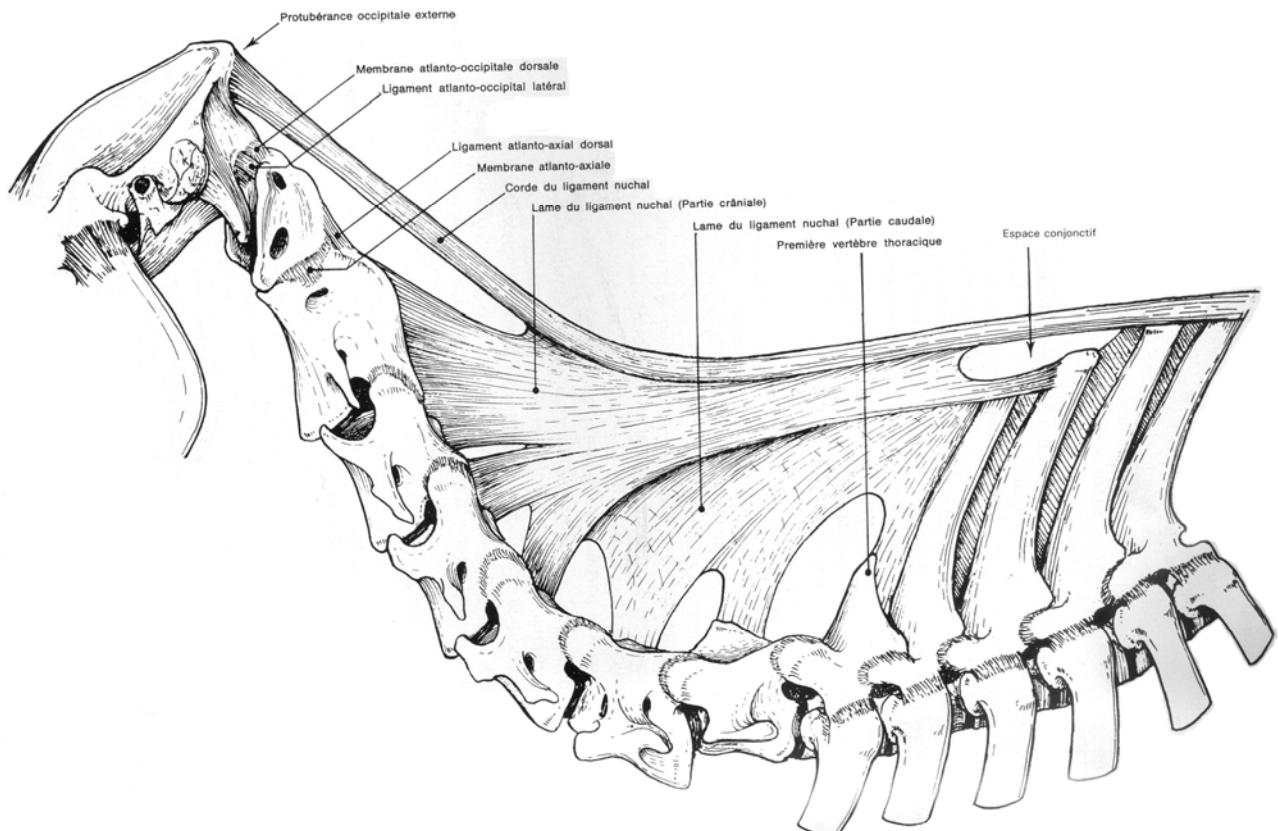


Figure n°10. Le ligament nuchal.
(Barone R.)

32. DISPOSITIONS PARTICULIERES A CERTAINES ARTICULATIONS INTERVERTEBRALES

321. ARTICULATION ATLANTO-OCCIPITALE

Cette articulation synoviale oppose chacun des condyles occipitaux à la surface articulaire crâniale de l'atlas. C'est la seule articulation extrinsèque de la tête qu'elle unit à la colonne vertébrale.

Elle permet principalement des mouvements de **flexion-extension**, des mouvements latéraux de faible amplitude sont en outre possible. Ces derniers complètent les mouvements de rotation de l'articulation atlanto-axiale.

322. ARTICULATION ATLANTO-AXIALE

L'articulation atlanto-axiale est une trochoïde ou articulation pivotante qui unit l'atlas à l'axis, la dent de l'axis jouant le rôle de pivot.

Cette formation est renforcée par de multiples ligaments et par l'action de nombreux muscles juxtavertébraux.

Le seul mouvement important permis par cette articulation est la rotation axiale.

323. ARTICULATIONS INTERTRANSVERSAIRES

Elles sont spécifiques des équidés.

Ce sont des articulations planiformes présentant des facettes articulaires à peine ondulées, taillées sur les bords adjacents des processus transverses ; des petites synoviales doublent leur face profonde.

Elles sont présentes de façon constante entre la cinquième et de la sixième vertèbre lombaire et entre la sixième vertèbre lombaire et les ailes du sacrum, ces dernières étant les plus larges et les plus étendues. Elles sont présentes de façon inconstante entre la cinquième et la quatrième vertèbre lombaire.

Complexe articulaire	% d'articulations intertransversaires	% de fusion entre les articulations**
L6-S1	100	0
L5-L6	100	59
L4-L5	88*	23
L3-L4	0	0

Tableau n°2. Fréquence des articulations intertransversaires et de leur fusion observées sur 17 colonnes vertébrales

(D'après Townsend et Leach 1984)

* pourcentage incluant un spécimen avec une articulation unilatérale

** pourcentage réunissant les fusions unilatérales et bilatérales

Parfois il existe une fusion de ces articulations, notamment entre L5 et L6. (Townsend et Leach 1984) (Cf. tableau n°2)

Les ligaments intertransversaires viennent les renforcer, ils sont formés par des faisceaux fibreux obliques d'un processus à l'autre.

324. ARTICULATIONS SACRO-ILIAQUES

Les aspects macroscopiques et histologiques normaux des articulations sacroiliaques sont encore mal connus en raison notamment des difficultés de leur examen en dissection. (Jeffcott et coll. 1985, Barone tome 2, p.235)

Certains auteurs les qualifient d'articulations mixtes, comportant une partie synoviale et une partie fibreuse. (Barone tome 2, p.233)

Pour d'autre, il s'agit d'une diarthrose. (Dalin et Jeffcott 1986)

La partie synoviale est incurvée en un croissant étroit et irrégulier ; elle est revêtue d'un cartilage à peu près lisse. La partie fibreuse s'étend dorso-crânialement à ce croissant dont elle occupe la concavité ; elle est recouverte d'un épais cartilage rugueux auquel est mêlé de gros faisceaux de collagène.

(Cf. figure n°11)

Les aspérités croissent avec l'âge et la forme des contours varie avec les individus (Dalin et Jeffcott 1986).

Les articulations sacro-iliaques constituent le centre de transmission des efforts propulsifs provenant des membres pelviens. Pour répondre à cette fonction, elles constituent donc une union très solide entre les os coxaux et les vertèbres et leur mobilité est très réduite.

La solidité de ces articulations est en partie assurée par de puissants ligaments dont notamment :

- ⇒ **Le ligament sacro-iliaque ventral** qui vient doubler la capsule articulaire le long de la marge ventrale des surfaces auriculaires.
- ⇒ **Le ligament sacro-iliaque dorsal** qui est constitué d'une *partie funiculaire* (partie la plus courte) étendue de l'angle de la croupe à la crête sacrale médiane et d'une *partie membraneuse* (partie la plus longue) qui se porte du bord ventral de la précédente au bord latéral du sacrum et des premières vertèbres coccygiennes. Il constitue ainsi un puissant moyen de contention destiné à limiter les mouvements de bascule de l'os ilium sur le sacrum.
- ⇒ **Le ligament sacro-sciatique** qui délimite latéralement la cavité pelvienne. Il s'attache dorsalement sur les tuber sacrale, les bords du sacrum et les

processus transverses de la première vertèbre caudale où il se confond avec le ligament sacro-iliaque dorsal. Il se termine ventralement par deux larges expansions sur l'épine sciatique d'une part et sur la tubérosité ischiatique d'autre part en délimitant la petite et la grande ouverture sciatique.

⇒ **Le ligament ilio-lombaire** est mince et large. Il prend son origine sur les trois ou quatre derniers processus transverses lombaires et se termine sur le revers ventral de la crête iliaque, jusqu'à l'angle de la hanche.

(Cf. figure n°12)

Enfin, l'os coxal et le sacrum sont aussi solidarisés par des muscles dont notamment les muscles psoas et iliaque, la masse commune de l'*erector spinae*, les muscles fessiers et les parties sacrales des muscles caudaux de la cuisse (Cf. myologie).

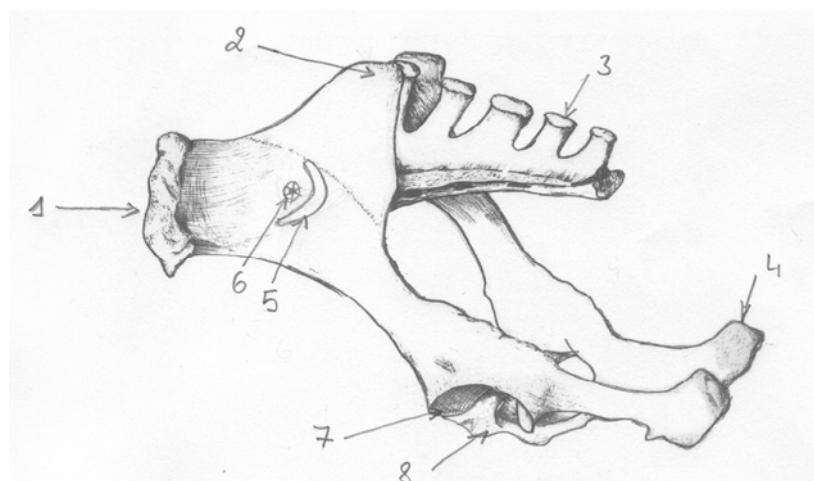


Figure n°11. Projection des articulations sacro-iliaques.

(Bassin vue latérale gauche)

(D'après Rooney 1969)

1 : tuber coxae,
2 : tuber sacrale,
3 : sacrum,
4 : tubérosité ischiatique,

5 : projection de la partie synoviale de
l'articulation sacro iliaque,
6 : projection de la partie fibreuse de
l'articulation sacro iliaque,
7 : acétabulum,
8 : pubis.

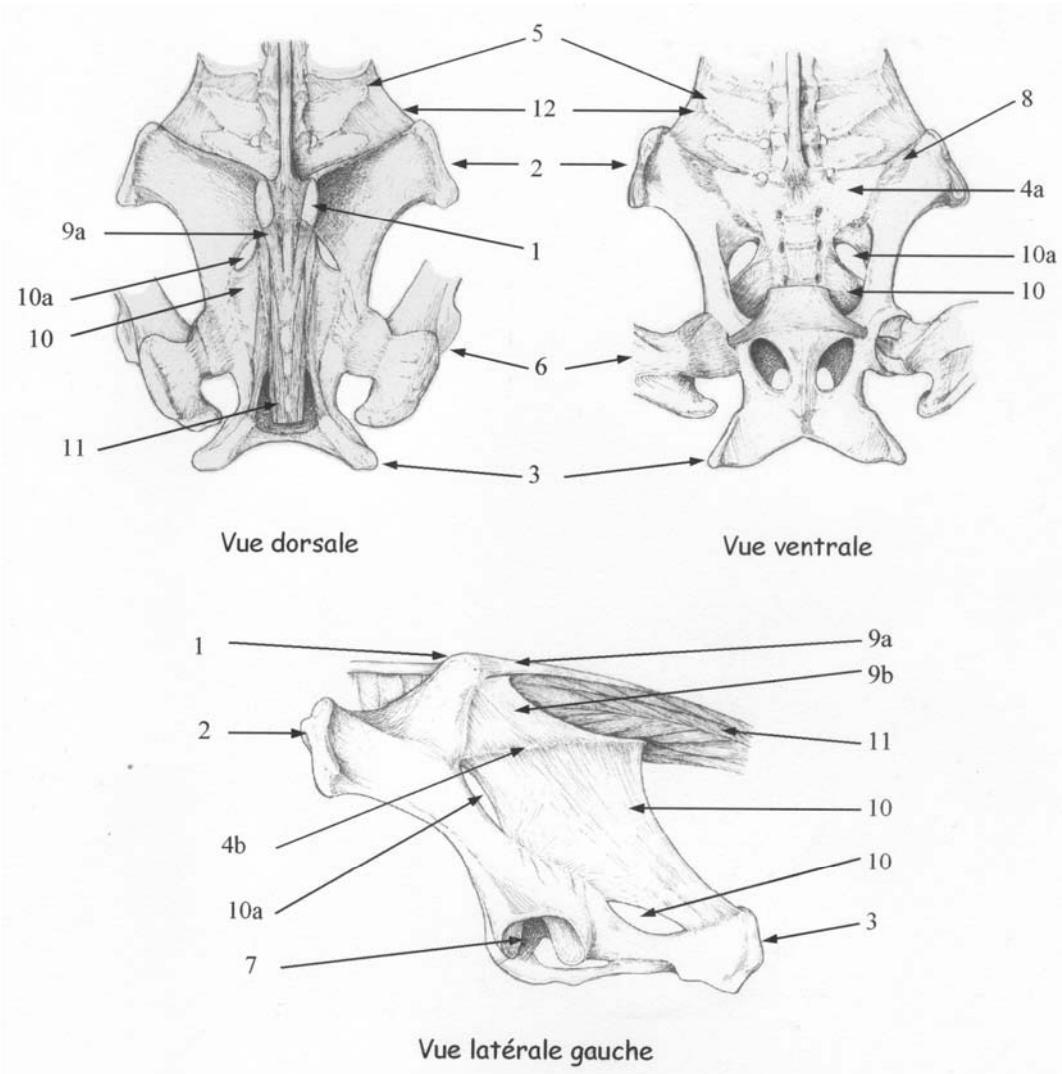


Figure n°12. Articulations du bassin.
(Barone R.)

- | | |
|---------------------------------------|--|
| 1. tuber sacrale | 9. ligament sacro-iliaque dorsal |
| 2. tuber coxae | a. partie funiculaire |
| 3. tubérosité ischiatique | b. partie membraneuse |
| 4. sacrum | 10. ligament sacro-sciatique |
| a. aile | a. grande ouverture sciatique |
| b. bord | b. petite ouverture sciatique |
| 5. 5 ^{ème} vertèbre lombaire | 11. muscles sacro-coccygien et queue
(coupée) |
| 6. fémur | 12. ligament ilio-lombaire |
| 7. acétabulum | |
| 8. ligament sacro-iliaque ventral | |

4. MYOLOGIE DE L'ENCOLURE ET DU TRONC

Le système musculaire a une organisation extrêmement complexe et il est difficile de décrire les muscles d'après un classement méthodique.

Le plus souvent, les muscles sont donc abordés de façon arbitraire d'après leur groupement topographique ; le corps est alors divisé en régions et les organes sont cités en fonction de leur rapport naturel en général du plan le plus superficiel vers le plus profond.

L'étude d'un muscle comprend d'une part la description de ses **insertions** (origine et terminaison) et d'autre part sa **fction** puis éventuellement son innervation.

En anatomie, la fonction d'un muscle est déduite de sa forme, de ses insertions et de sa situation. Ainsi il n'est pas rare d'appliquer aux muscles des qualificatifs qui définissent leur rôle le plus caractéristique, ce qui est parfois contestable comme nous le verrons plus loin.

Parfois l'action d'un muscle peut être inversée dans certaines conditions ; un muscle dont la traction s'effectue habituellement de son origine sur sa terminaison devient au contraire moteur de son point d'origine lorsque la terminaison est solidement fixée, ce qui peut être le cas par exemple lorsqu'un membre est à l'appui.

Les muscles qui concourent aux mêmes mouvements sont dits **congénères** ou **agonistes**, ceux qui permettent des mouvements opposés sont **antagonistes**. D'autre part, même les mouvements les plus simples exigent toujours une **synergie fonctionnelle** ou action simultanée d'un nombre plus ou moins grand de muscles ; il est exceptionnel qu'un muscle se contracte de façon isolée. Des études électromyographiques *in vivo* montrent que les groupes de muscles agonistes et antagonistes fonctionnent toujours ensemble pour maintenir l'harmonie du mouvement. Ainsi, un muscle n'est pas seulement actif quand il est contracté, une activité électrique peut être enregistrée dans des muscles qui sont étirés. Il existe donc deux types de « contractions » musculaires : les **contractions concentriques** lorsqu'il y a un raccourcissement du muscle et les **contractions excentriques** lorsqu'il y a un allongement.

Les muscles de la région axiale qui vont retenir notre attention, se divisent en deux types en fonction de leurs insertions ; **d'une part les muscles spinaux** qui prennent attaché uniquement sur la colonne vertébrale et **d'autre part les**

muscles qui unissent le squelette axial avec les autres parties du corps. Les muscles concernés sont nombreux et une étude précise de chacun d'entre eux ne présenterait que peu d'intérêt pour la suite de ce travail. Ainsi, nous étudierons plus en détail, seulement les plus importants d'un point de vue locomoteur et qui seront abordés dans l'analyse biomécanique qui suit.

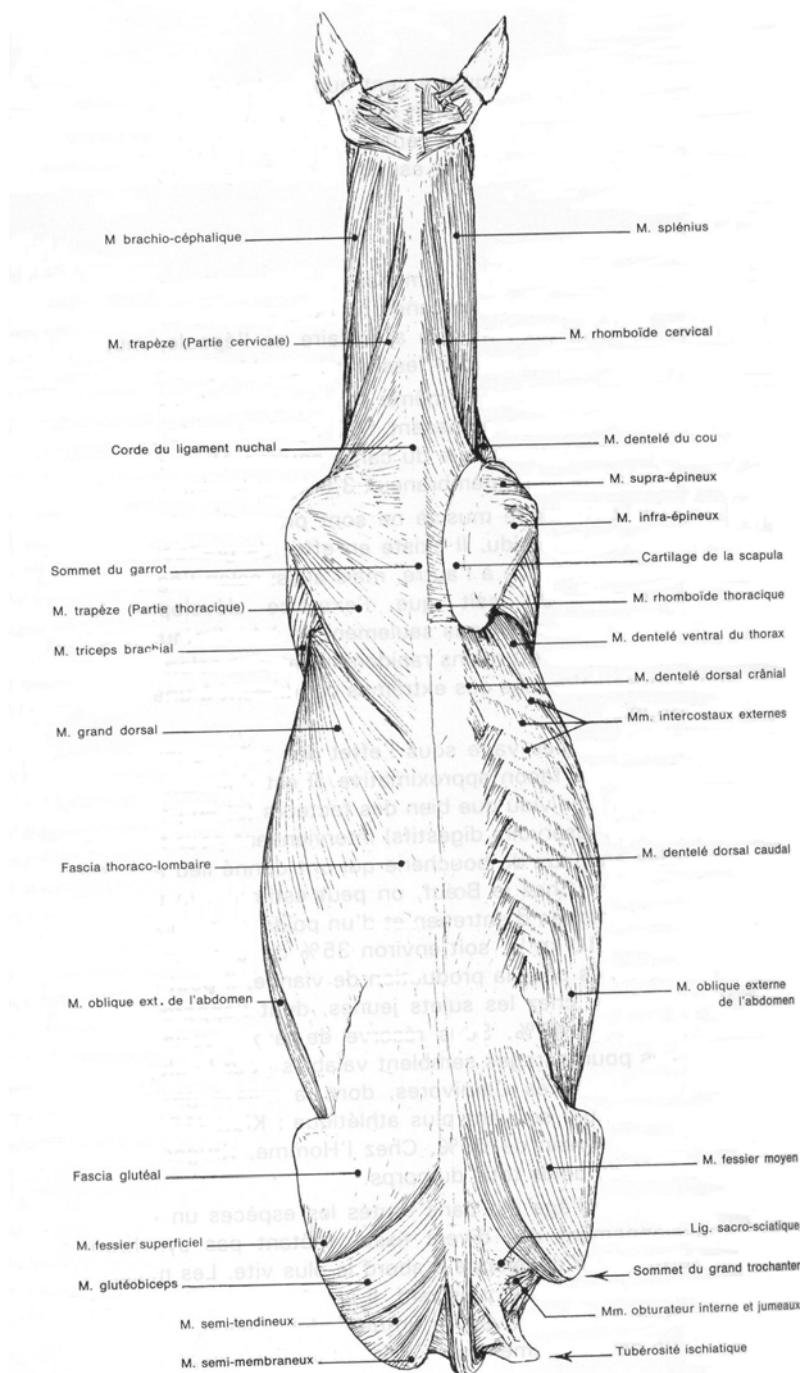


Figure n°13. Les muscles du cheval. Vue dorsale.
(Barone R.)

Les muscles superficiels ont été enlevés du côté droit.

41. LES MUSCLES DE L'ENCOLURE

Les muscles de l'encolure sont regroupés autour des vertèbres cervicales ; un grand nombre d'entre eux a une insertion sur la tête. Ils mobilisent donc le balancier cervico-céphalique. De plus, pour la majorité ils ne sont pas limités à la région de l'encolure et s'étendent caudalement sur le thorax et l'extrémité proximale du membre thoracique qu'ils concourent à fixer au tronc.

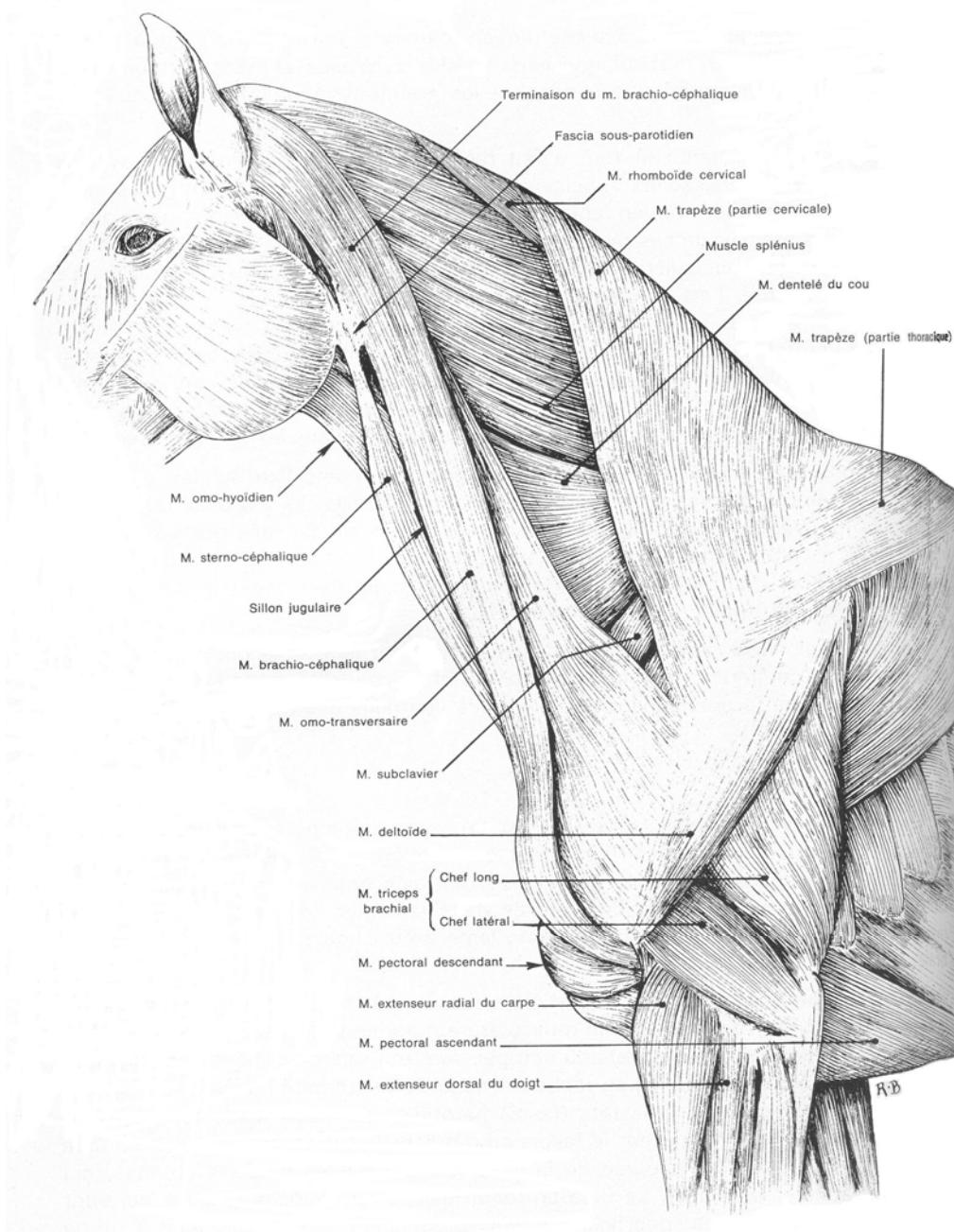


Figure n°14. Muscles superficiels de l'encolure.
(Barone R.)

Les muscles de cette région peuvent se diviser en **trois groupes** basés plus ou moins sur des critères topographiques et fonctionnels ; les muscles de la **région cervicale ventrale** qui longent la trachée, ceux de la **région cervicale dorsale** qui sont situés de part et d'autre du ligament nuchal et les **muscles juxtavertébraux**. Enfin les **muscles de la nuque** présentent des caractéristiques un peu plus particulières afin d'affiner les déplacements de la tête.

Cf. figures n°14,15 et 16.

411. LES MUSCLES DE LA REGION CERVICALE VENTRALE

Ces muscles entourent latéralement et ventralement la trachée et les organes qui les entourent. Il s'agit principalement des fléchisseurs de la colonne cervicale :

Le muscle brachio-céphalique prend son origine sur la crête humérale par une attache commune avec le pectoral descendant et se termine sur crête mastoïdienne. Lorsque la tête est fixe il est agent de la protraction du membre antérieur, lorsque le membre est à l'appui il est fléchisseur de l'encolure si son action est bilatérale et il provoque une latéro-flexion si elle est unilatérale.

Le muscle sterno-céphalique s'insère sur le manubrium sternal et se termine sur le bord caudal de la mandibule. Il est fléchisseur de l'encolure et de la nuque et il provoque une rotation et une latéro-flexion cervicale si son action est unilatérale.

Les muscles scalènes forment un groupe complexe étendu des processus transverses des quatre dernières vertèbres cervicales jusqu'à la face externe de la première côte. Ils sont inspirateurs lorsque les vertèbres cervicales sont prises pour point fixe et fléchisseurs de la base de l'encolure s'ils prennent les côtes comme point fixe.

412. LES MUSCLES DE LA REGION CERVICALE DORSALE

Les muscles de cette région sont situés dorsalement aux vertèbres cervicales et sont séparés de leurs homologues controlatéraux par le ligament nuchal. La majorité d'entre eux s'étendent plus ou moins largement dans la région dorsale et prennent insertions sur les vertèbres thoraciques, créant un pont musculaire

continu entre l'encolure et de dos. Il s'agit essentiellement des extenseurs de l'encolure :

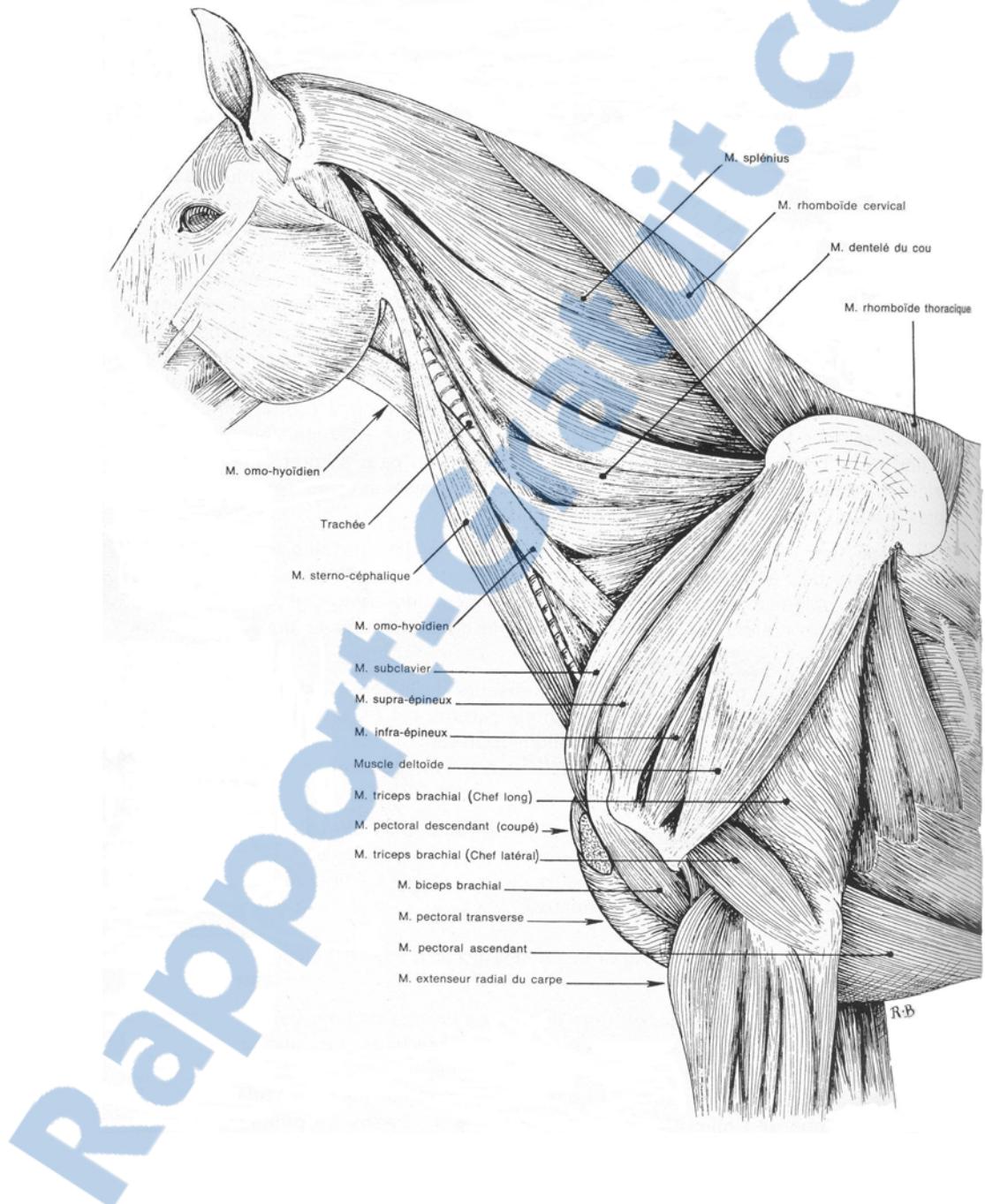
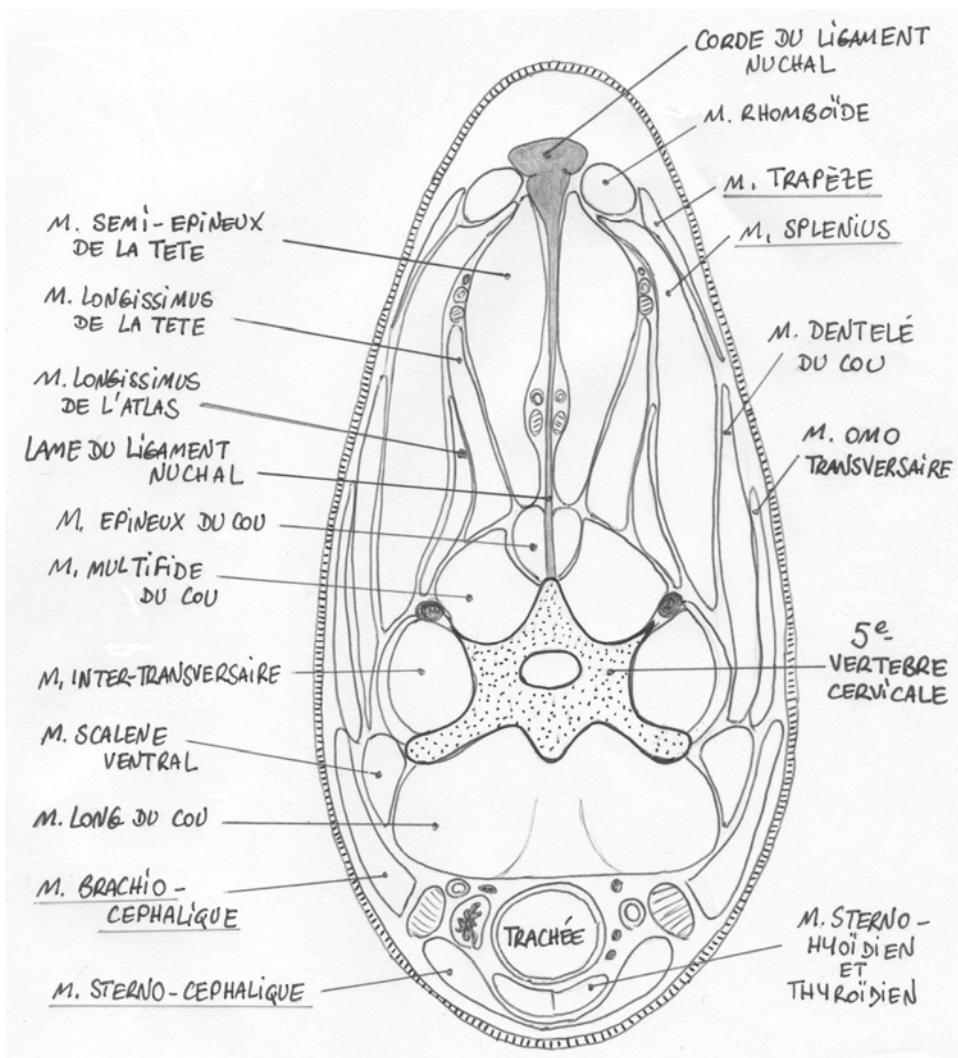


Figure n°15. Muscles de l'encolure.
(Barone R.)

Après ablation des muscles trapèze et brachio-céphalique

Le muscle trapèze porte ses attaches de la moitié caudale de la corde du ligament nuchal jusqu' à la neuvième vertèbre thoracique sur le ligament supra-épineux. Il se termine sur l'épine scapulaire. Il est essentiellement adducteur de l'épaule et lorsqu'il prend les ligaments pour point fixe il concourt aux déplacements de l'extrémité caudale de la scapula. Lorsqu'il prend la scapula pour un point fixe il peut contribuer à une légère extension de l'encolure ou du moins à en limiter la flexion.



**Figure n°16. Schéma de la coupe transversale de l'encolure,
Passant par la cinquième vertèbre cervicale**

(D'après Barone)

Les muscles soulignés ont fait l'objet de mesures électromyographiques.

Le muscle rhomboïde unit la colonne vertébrale au bord de la scapula, tout comme le muscle trapèze il appartient aux régions dorsales de l'encolure et du thorax. Il s'insère sur la corde du ligament nuchal et sur les six premiers processus épineux thoraciques. Il se termine sur la face médiale du cartilage scapulaire. Lors de l'appui, les vertèbres cervicales sont prises pour point fixe, il tire alors la scapula crânialement. S'il prend la scapula pour point fixe il concourt au soutien de la base de l'encolure et à l'extension de la région cervicale basse.

Le muscle dentelé du cou unit lui aussi la colonne cervicale au bord de la scapula, il est en continuité avec le muscle dentelé ventral du thorax. Il s'attache par ses dentelures sur les processus transverses des cinq dernières vertèbres cervicales et se termine sur le revers médial de l'angle crânial de la scapula. C'est un auxilliaire du muscle rhomboïde.

Le muscle splénius prend son origine sur le fascia thoraco-lombaire et les premiers processus épineux thoraciques, il se termine sur la crête mastoïdienne, sur l'aile de l'atlas et les processus transverses des quatre vertèbres cervicales suivantes. Lorsque le point fixe est caudal et que la contraction est bilatérale il est extenseur de la tête et du cou, alors qu'une contraction unilatérale étend la tête en lui faisant réaliser une rotation et une latéro-flexion. Lorsque le point fixe est crânial il est tenseur du fascia thoraco-lombaire et provoque une extension thoracique (Denoix et Pailloux 2001).

Le muscle semi épineux de la tête prend aussi son origine sur le fascia thoraco-lombaire et les premiers processus épineux thoraciques en commun avec le muscle splénius ainsi que sur les processus transverses de la région du garrot et les processus articulaires des six dernières vertèbres cervicales. Il se termine sur la protubérance occipitale externe. Lorsqu'il prend un point fixe caudal, c'est un puissant extenseur de la nuque et de l'encolure par contraction bilatérale. Lorsqu'il prend un point fixe crânial il devient tenseur du fascia thoraco-lombaire et participe à l'extension de la base de l'encolure (Denoix et Pailloux 2001)

Le muscle épineux du cou s'insère sur les processus épineux thoraciques et se termine sur les processus épineux des quatre dernières vertèbres cervicales. Il est extenseur de l'encolure.

Il se prolonge en région thoracique en commun avec le muscle semi épineux de la tête par le muscle épineux de la masse commune de l'erector spinae.

413. LES MUSCLES JUXTAVERTEBRAUX DE L'ENCOLURE

Cf. figures n°16 et 17.

Il s'agit des muscles directement appliqués à la colonne vertébrale. Au niveau de la région cervicale moyenne ils sont nettement métamérisés. Plus cranialement ces muscles se modifient pour agir plus spécifiquement sur la tête ; ils s'agit du système des muscles extrinsèques de la tête moteur des articulations atlanto-axiale et atlanto-occipital qui comprend notamment le muscle oblique caudal et le muscle long de la tête, principaux extenseurs et fléchisseurs de la nuque.

Cette musculature profonde n'est pas simplement motrice de la colonne cervicale, elle assure aussi d'une part la contention des articulations intervertébrales et d'autre part grâce à une riche innervation sensorielle et proprioceptive le contrôle du positionnement de la colonne vertébrale et la régulation de son tonus musculaire (Denioix et Pailloux 2001).

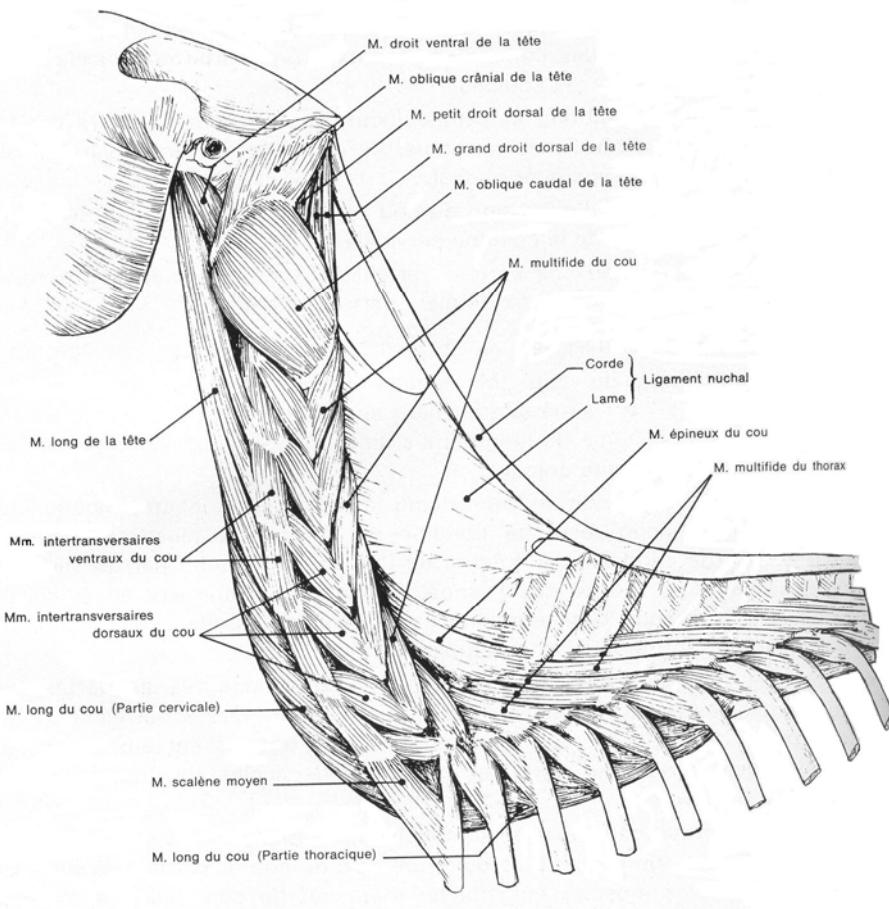


Figure n°17. Les muscles juxtavertébraux de l'encolure.

(Barone R.)

Vue latérale gauche.

Le muscle long du cou est le plus volumineux d'entre eux, il est situé à la face ventrale des vertèbres cervicales et des premières thoraciques. Il présente deux parties distinctes d'orientation opposée ; l'une cervicale qui s'insère sur les processus transverses des six dernières vertèbres cervicales et se termine par un tendon sur l'atlas et l'autre thoracique qui prend origine sur le corps de la sixième vertèbre thoracique et se termine sur le tubercule caudal de la sixième cervicale. Ce muscle est donc fléchisseur de la colonne cervicale et peut concourir aux mouvements de rotation.

Le muscle multifide du cou qui se présente comme une série de faisceaux obliques et régulièrement chevauchants, situés entre les processus transverses et les processus épineux. Il peut donc participer aux mouvements d'extension de l'encolure, de latéro-flexion et de torsion.

Le muscle longissimus du cou qui est en continuité avec le longissimus du thorax. Il présente lui aussi plusieurs faisceaux imbriqués les uns dans les autres et s'insère sur les cinq premières vertèbres thoraciques et les six dernières cervicales. De même que le muscle multifide il peut participer aux mouvements d'extension cervicale et à la latéro-flexion si la contraction est unilatérale. Il se prolonge dans la région thoracique par le muscle longissimus de la masse commune de l'*erector spinae*.

Les muscles intertransversaires du cou qui sont plus développés que leurs homologues des autres régions de la colonne vertébrale. Ils occupent l'espace situé entre les processus transverses de l'axis jusqu'à la première vertèbre thoracique.

414. LES MUSCLES DE LA NUQUE

Il s'agit de muscles qui s'insèrent pour la grande majorité sur le tiers supérieur de l'encolure. Ils ont pour fonction d'affiner les mouvements de la tête.

Le muscle oblique caudal de la tête s'insère sur le processus épineux de l'axis et se termine sur les ailes de l'atlas. C'est le principal rotateur de la tête.

Le muscle grand droit dorsal de la tête s'insère aussi sur le processus épineux de l'axis et se termine sur la protubérance occipitale externe. Il permet l'extension de la tête ainsi que sa latéro-flexion lorsqu'il se contracte unilatéralement. C'est un auxiliaire du muscle semi épineux.

Le muscle long de la tête prend ses origines sur la face ventrale des processus transverses de la troisième à la sixième vertèbre cervicale. Il se termine par un tendon sur l'os occipital. C'est un puissant fléchisseur de la tête.

42. LES MUSCLES DU TRONC

De même que pour la région de l'encolure ces muscles peuvent se répartir dans plusieurs groupes. Tout d'abord les **muscles du thorax** dont nous étudierons seulement les muscles pectoraux. Puis les muscles de la **région du dos**, de la **paroi ventrale de l'abdomen** et de la **région lombo-iliaque**. Enfin, les muscles **juxtavertébraux** abordés au niveau de l'encolure qui se prolongent dans le tronc autour des vertèbres thoraciques et lombaires assurent là aussi la proprioception de la station et de la locomotion (Denoix et Pailloux 2001).

421. LES MUSCLES PECTORAUX

Les muscles pectoraux couvrent la face ventrale du thorax où il concourt à former la région axillaire. Ils s'insèrent sur le sternum ou son voisinage et se terminent sur la ceinture du membre thoracique. Ils ont une disposition simple en deux couches, l'une superficielle formée par les muscles pectoraux descendant et transverse et l'autre profonde avec les muscles pectoral ascendant et subclavier.

Le muscle pectoral descendant constitue la base anatomique de la région du poitrail. Il s'insère sur le manubrium sternal, sonaponévrose terminale s'unit avec l'extrémité du muscle brachio-céphalique et s'attache sur la crête humérale. Il est adducteur et rotateur interne du bras, qu'il tire en même temps en direction crâniale. Lorsque le membre est pris comme point fixe, il concourt à tirer le sternum en direction caudale et à faire descendre le thorax entre les épaules.

Le muscle pectoral transverse est situé caudalement au pectoral descendant. Il prend origine sur la crête sternale et se termine sur la face médiale du coude et de l'avant bras à la surface du fascia antébrachial. Il est adducteur du membre thoracique et tenseur du fascia antébrachial.

Le muscle pectoral ascendant est le plus volumineux du groupe. Il s'insère sur la face latéro-ventrale du sternum et sur la tunique abdominale au voisinage de la région xyphoïdienne il se termine sur la crête du tubercule mineur de l'humérus et sur la lèvre médiale du sillon intertubéculaire. Il est adducteur et rotateur interne du rayon huméral. Lorsqu'il prend point fixe sur ses attaches sterno-abdominale, il tire en direction caudale l'angle de l'épaule ; il est alors antagoniste du muscle brachio-céphalique et agit en synergie avec le muscle grand dorsal. Lorsque le membre est à l'appui, cette action a pour effet de redresser la scapula. Enfin, s'il prend point fixe sur son attache humérale, il soulève le thorax entre les épaules et agit alors comme un puissant agoniste du muscle dentelé ventral du thorax.

Le muscle subclavier est très volumineux chez les équidés. Il est situé au bord crânial du muscle pectoral ascendant. Il s'insère sur les quatre premières sternèbres et les cartilages costaux correspondants et se termine par une large aponévrose qui prend attache sur le fascia scapulaire et l'angle crânial de la scapula. Chez les équidés, il a acquis un rôle important dans le soutènement de l'angle scapulo-huméral et dans la locomotion. Ainsi, il tire la partie dorsale de la scapula en direction crâniale et par une action synergique avec le muscle pectoral ascendant il amène en direction caudale l'articulation scapulo-humérale ce qui tend à ouvrir cette dernière et concourt à la détente du membre.

422. LES MUSCLES DE LA REGION DU DOS

Cf. figures n°18, 19, 20 et 21.

Parmi ces muscles aucun ou presque n'appartient exclusivement à la région du dos, ils sont en effet communs soit au thorax et à l'encolure soit au thorax et à la région lombaire. Ainsi, la majorité d'entre eux aura été décrit soit dans la région de l'encolure soit avec les muscles de la région lombaire. On y distingue un premier groupe musculaire qui inclut notamment les muscles grand dorsal, trapèze et rhomboïde. Ces muscles se portent du sommet du garrot jusqu'à la scapula ou à l'humérus et unissent donc le membre thoracique au tronc. Puis on y trouve un second groupe formé d'un ensemble musculaire plus profond et uniquement composé de muscles spinaux qui commence dans la région sacro-iliaque par une masse commune et se diversifie avant d'atteindre le thorax. Cet ensemble est nommé *l'erector spinae* et comprend les muscles suivants ; épineux, longissimus et iliocostal. Plus profondément encore et au contact direct des

vertèbres se trouvent les muscles juxtavertébraux du dos qui sont en continuité avec ceux de l'encolure.

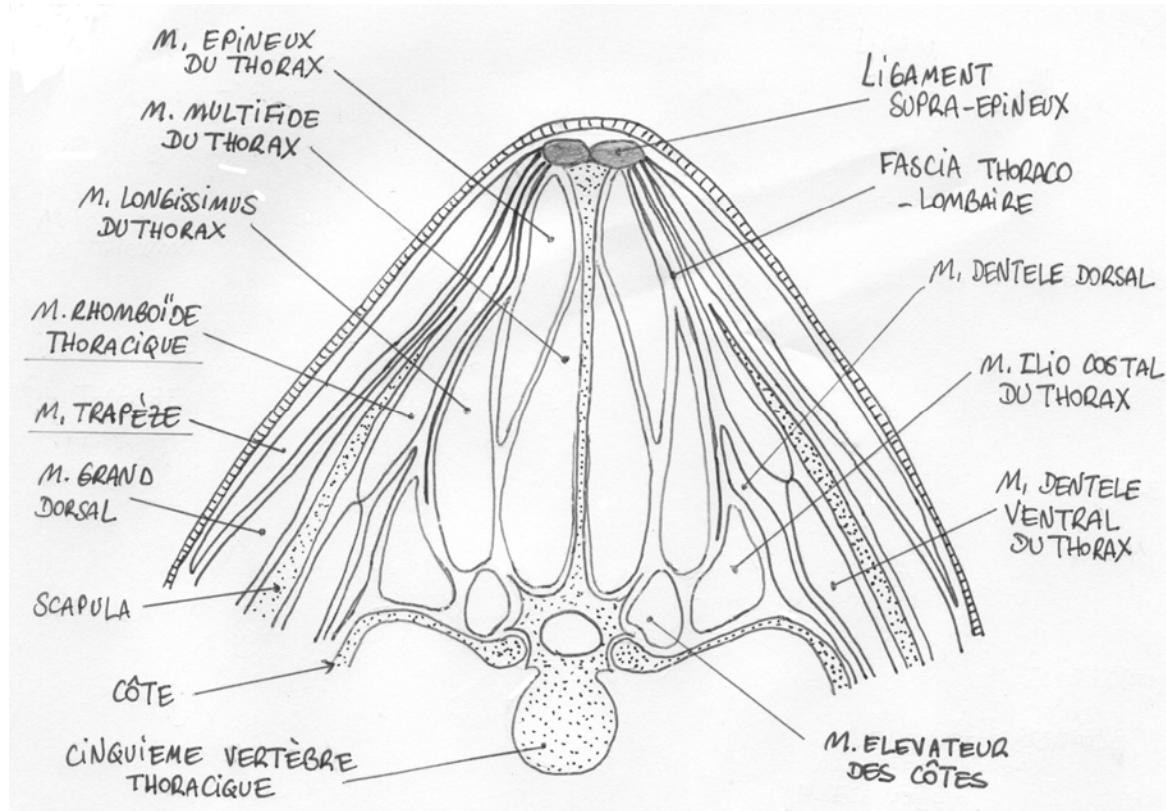


Figure n°18. Schéma de la coupe transversale du garrot.

Passant par la cinquième vertèbre thoracique.

(D'après Barone, Haussler 1999a)

Les muscles soulignés ont fait l'objet d'enregistrements électromyographiques.

Le muscle grand dorsal est un très large muscle qui recouvre toute la région du dos et des lombes. Il s'insère par sonaponévrose sur les processus épineux des vertèbres thoraciques (sauf les premières) et lombaires, il se termine par un tendon commun avec le muscle grand rond à la face médiale de l'humérus. S'il prend la colonne vertébrale comme point fixe, il tire le membre en direction caudale il est alors agoniste du muscle pectoral ascendant et antagoniste du muscle brachio-céphalique. Lorsque le membre est fixe il exerce une traction crâniale sur le tronc et pourrait ainsi intervenir dans sa propulsion.

Le muscle erector spinae est contenu dans le fascia thoraco-lombaire. Il s'agit d'une puissante masse musculaire qui s'insère sur la crête iliaque, la face dorsale des processus transverses lombaires et thoraciques et l'extrémité dorsale des côtes. Plus crânialement dans la région thoracique, cette masse commune se

divise en trois muscles distincts par leur topographie, leur terminaison et leur rôle potentiel : les muscles ilio-costal, longissimus et épineux. Ils se prolongent dans la région cervicale par les muscles épineux, semi épineux, longissimus et ilio-costal du cou.

- ⇒ *Le muscle ilio-costal est le plus latéral. Il se termine sur la face latérale des côtes dont chacune présente à cet effet le tubercule ilio-costal. Il joue surtout un rôle dans les mouvements expiratoire, il permet toutefois la latéro flexion thoraco-lombaire.*
- ⇒ *Le muscle longissimus se situe entre les muscles ilio-costal et épineux. C'est le plus volumineux de la masse commune qu'il prolonge directement. Il se termine sur les processus transverses thoraciques et lombaires et l'extrémité dorsale des côtes. Il est extenseur de la colonne vertébrale et permet aussi sa latéro-flexion.*
- ⇒ *Le muscle épineux est le plus médial. Il se termine sur la partie terminale des processus épineux thoraciques. Il est extenseur de la colonne thoraco-lombaire.*

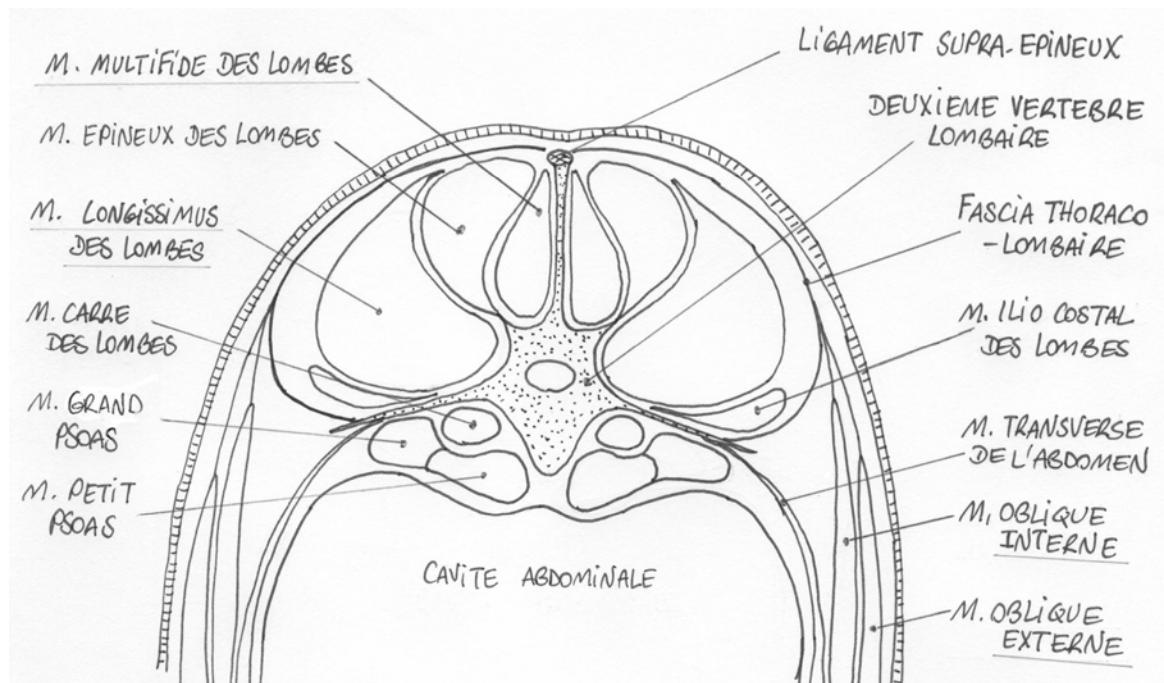


Figure n°19. Schéma de la coupe transversale des muscles de la colonne vertébrale en région lombaire.

Passant par deuxième vertèbre lombaire
(Adapté d'après Barone, Haussler 1999a)

423. MUSCLES DE LA PAROI LATERO-VENTRALE DE L'ABDOMEN

Il s'agit de quatre muscles pairs, plats et larges avec une partie charnue et une partie aponévrotique qui sont superposés l'uns sur les autres. Ils constituent la paroi ventrale de la cavité abdominale et concourent à la protection et au maintien des viscères abdominaux et participent aux mouvements expiratoires. Sur le plan locomoteur, ils sont relativement peu épais, ainsi leur efficacité tient à deux facteurs ; d'une part l'étendue de leur corps musculaire et d'autre part à l'excentricité de leurs insertions par rapport à l'axe vertébral qui leur permet d'agir sur d'importants leviers (Denoix et Pailloux 2001).

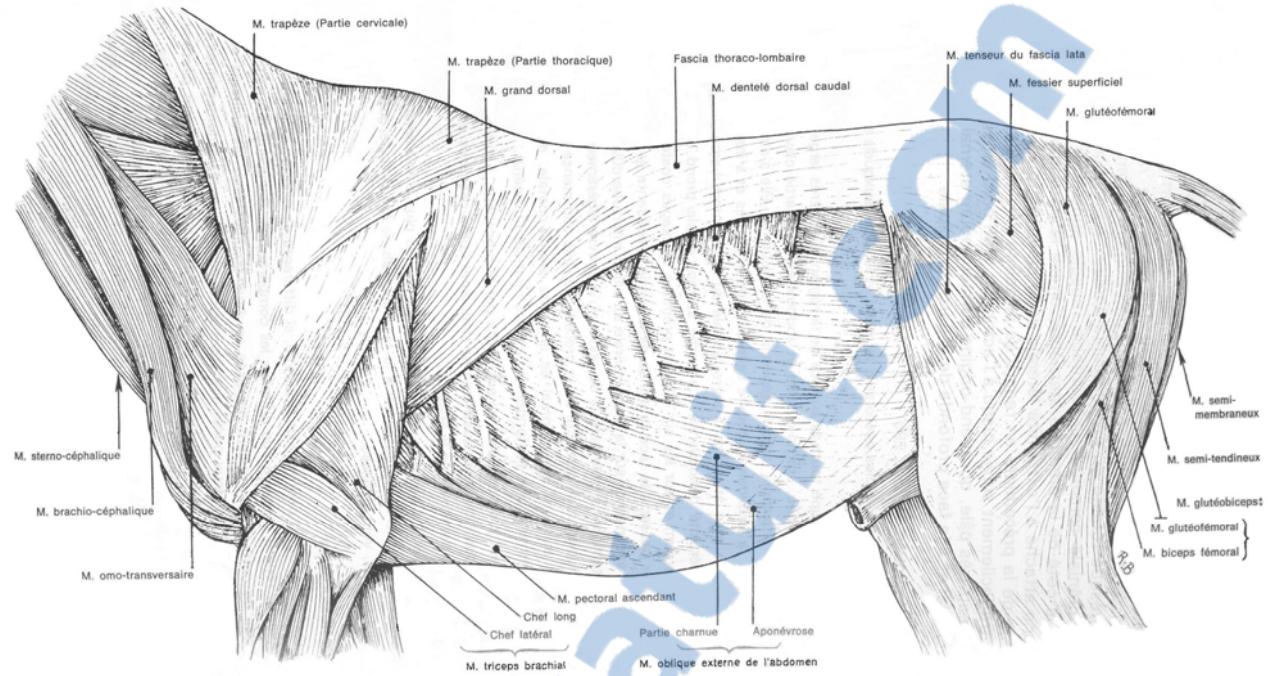
Ils sont encore communément appelés les « muscles abdominaux ».

Le muscle oblique externe est le plus superficiel mais aussi le plus vaste du groupe. Il s'insère sur la face latérale des treize dernières côtes, caudalement à la dernière côte sa partie charnue s'étend jusqu'au fascia thoraco lombaire à l'angle de la hanche. Il se termine par une aponévrose sur toute la longueur de la ligne blanche et de l'arcade inguinale. En plus de son rôle dans l'expiration et le maintien des viscères abdominaux, il est aussi fléchisseur de la colonne thoraco-lombaire et concourt à la latéro-flexion et la rotation de ce segment si la contraction est unilatérale.

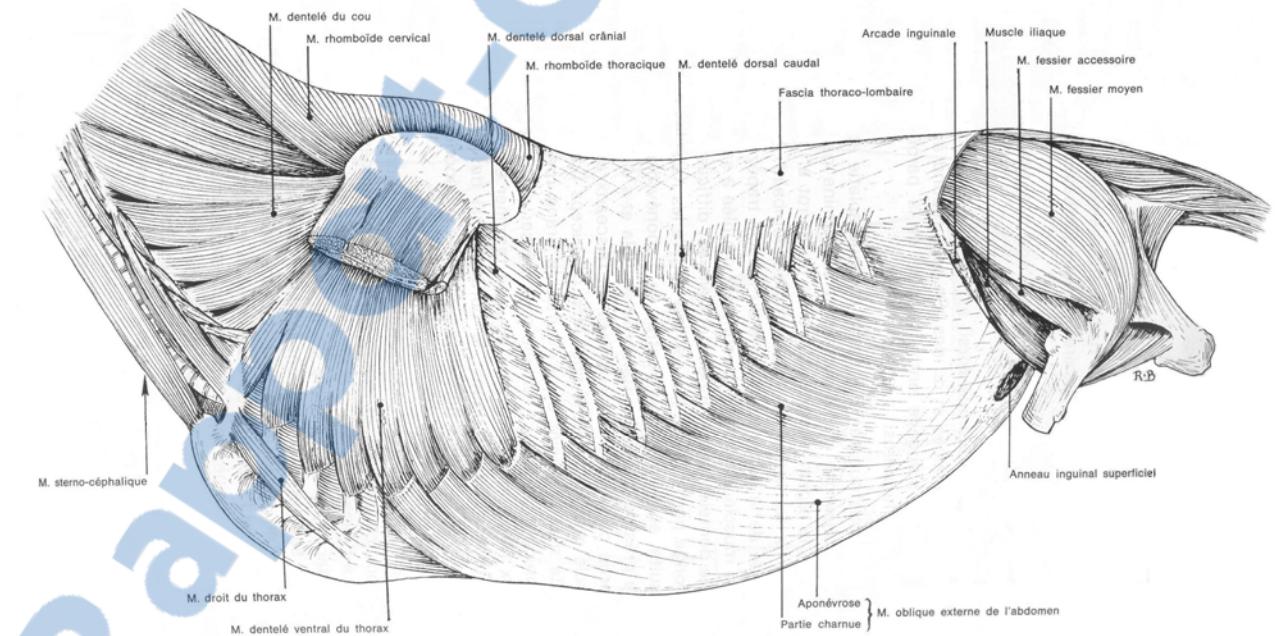
Le muscle oblique interne est presque aussi large que l'oblique externe. Sa partie charnue s'insère sur le fascia thoraco-lombaire, l'épine iliaque ventro-craniale (angle de la hanche) et sur l'arcade inguinale. Il se termine par une aponévrose qui s'attache sur la face médiale de l'extrémité des dernières côtes et sur la ligne blanche jusqu'au tendon prépubien. C'est un agoniste du muscle oblique externe du même côté sauf pour les mouvements de rotation de la colonne vertébrale thoraco-lombaire pour lesquels il est antagoniste (Denoix et Pailloux 2001).

Le muscle droit de l'abdomen forme une large bande étendue de la face ventrale du sternum à l'os pubis. Il s'insère sur le sternum et les cartilages costaux et sur le bord crânial du pubis par le tendon prépubien. Il soulève et comprime les viscères abdominaux et il est fléchisseur de la région thoraco-lombo-sacrée.

Le muscle transverse de l'abdomen occupe le plan le plus profond. Sa partie charnue s'insère sur la face interne des trois dernières côtes et sur les processus transverses lombaires. Sa partie aponévrotique s'attache sur la ligne blanche.



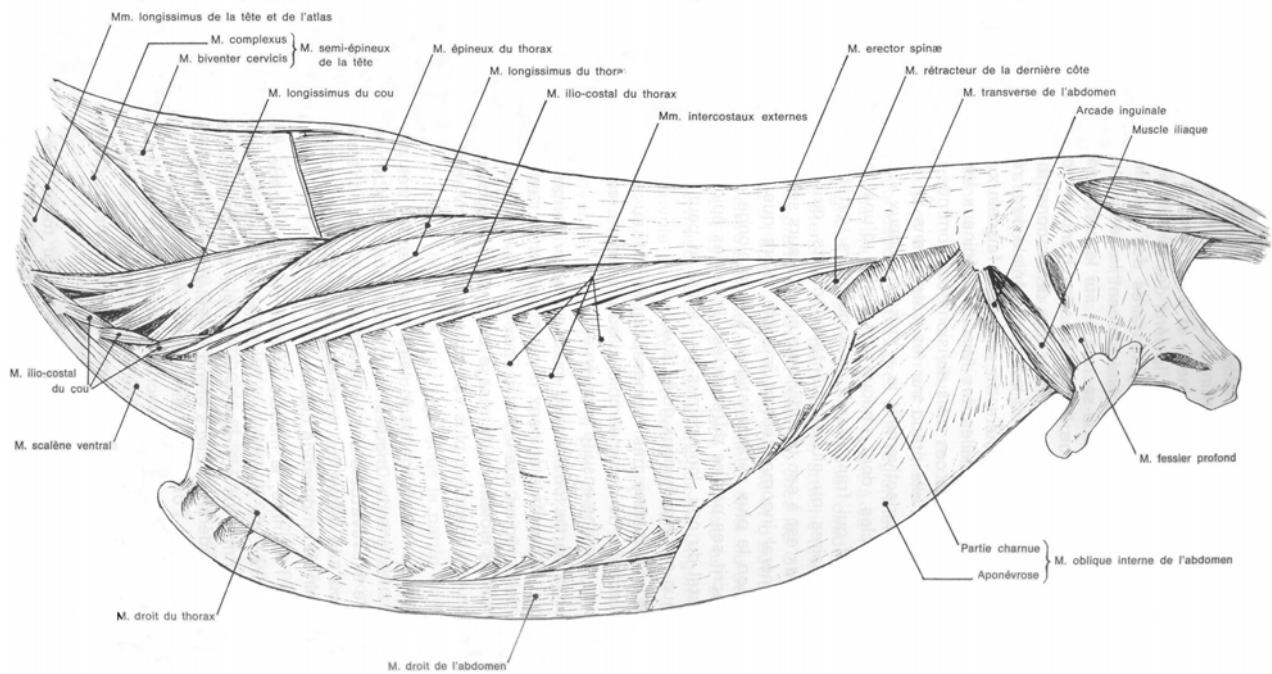
Muscles superficiels du tronc



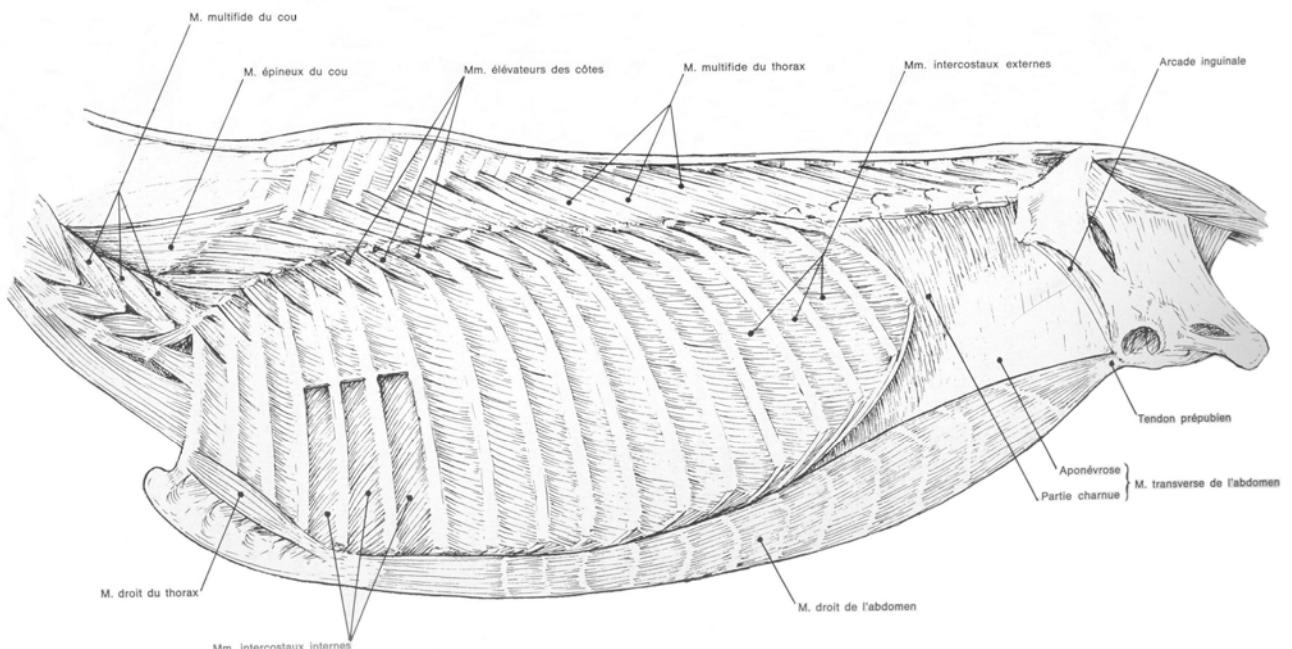
Plan des muscles dentelés ventraux et oblique externe de l'abdomen.

Figure n°20. Muscles du thorax et de l'abdomen

Plans superficiels
(Barone R.)



Plan des muscles *erector spinae* et *oblique interne de l'abdomen*.



Plan profond, muscles juxtavertébraux.

Figure 21. Muscles du thorax et de l'abdomen.

Plans profonds
(Barone R.)

424. MUSCLES DE LA REGION LOMBO-ILIAQUE

Cf. figures 19 et 22.

Ces muscles forment la paroi dorsale de la cavité abdominale, ils sont parfois qualifiés de muscles sous lombaires et certains auteurs les considèrent comme une extension de la musculature des membres pelviens.

Le muscle petit psoas s'insère sur la face ventrale des corps vertébraux des trois dernières vertèbres thoraciques et des cinq premières lombaires, il se termine sur la tubérosité du muscle petit psoas sur le col de l'ilium. Il est fléchisseur de l'articulation lombo-sacrée (et sacro-iliaque).

Le muscle grand psoas s'insère sur la face ventrale des processus transverses des vertèbres lombaires et des deux dernières côtes. Il se termine par un tendon commun avec le muscle iliaque sur le petit trochanter du fémur. Lorsqu'il prend point fixe sur la région lombaire il est fléchisseur de la cuisse sur le bassin. Il est aussi rotateur externe du rayon fémoral : action notamment plus efficace quand la cuisse est en demi flexion. Lorsqu'il prend point fixe sur le fémur il est fléchisseur de l'articulation lombo-sacrée et permet la rotation et la latéro-flexion du segment lombaire quand il se contracte unilatéralement.

Le muscle iliaque s'unit à la terminaison du muscle grand psoas avec lequel il constitue dans certaines espèces et notamment chez l'homme le muscle ilio-psoas. Chez les équidés il est presque complètement distinct ce qui justifie qu'on les étudie séparément. Il s'insère sur la face pelvienne de l'os ilium jusqu'au bord de la crête iliaque et atteint aussi l'angle de la hanche. Il est agoniste du muscle grand psoas quand ce dernier agit sur la cuisse en tant que fléchisseur et rotateur externe du rayon fémoral. Lorsque le point fixe est le fémur, c'est un agent puissant de la flexion du bassin sur la cuisse.

Le muscle carré des lombes est peu développé chez les équidés. Il s'insère sur la crête iliaque et se termine sur la face ventrale des processus transverses lombaires. Il est fléchisseur de la colonne vertébrale lombaire si la contraction est bilatérale et permet une latéro-flexion lombaire lorsqu'il agit d'un seul côté.

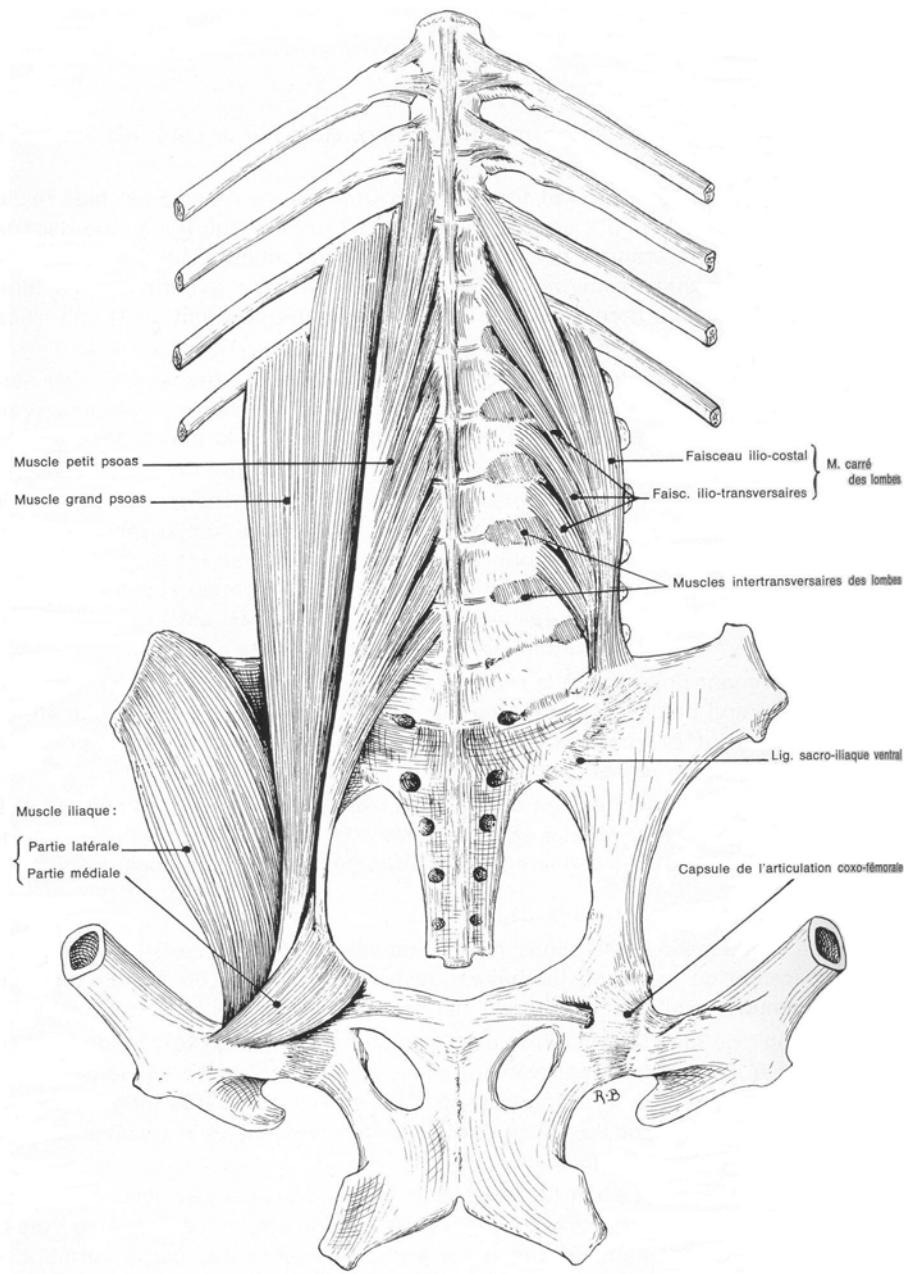


Figure n°22. Les muscles sous lombaires.
(Barone R.)

Le fascia iliaca a été enlevé du côté droit du sujet et les muscles iliaques et psoas du côté gauche

43. LES MUSCLES DE LA CEINTURE ET DU MEMBRE THORACIQUE

Ces muscles ne font pas vraiment partie de l'étude de la musculature de l'encolure et du tronc mais certains d'entre eux présentent une insertion proximale qui les unissent plus ou moins directement au squelette axial et leur permet ainsi de jouer un rôle dans le maintien et la mobilité vertébrale.

431. LES MUSCLES DE L'EPAULE

Ces muscles sont groupés autour de la scapula, sur laquelle ils prennent origine. Ils se terminent tous sur l'humérus et sont donc moteur de l'articulation scapulo-humérale. Leur lien avec la région axiale est donc indirect ; il est assuré par les muscles qui unissent le membre thoracique à l'encolure et au tronc notamment les muscles trapèze, rhomboïde et dentelé du cou crânialement et les muscles grand dorsal et dentelé du thorax caudalement. Ils se répartissent sur les deux faces de la scapula et déterminent ainsi deux régions : la **région scapulaire latérale** qui groupe les muscles de l'abduction de l'épaule et la **région scapulaire médiale** dont les muscles sont adducteurs.

Le muscle deltoïde couvre une grande partie de l'épaule dont il occupe le plan superficiel. Ses insertions d'origine sont limitées à la scapula, il se termine par un tendon sur la tubérosité deltoïdienne de l'humérus. C'est un des principaux abducteurs du bras dont il est aussi rotateur externe. Il devient fléchisseur du bras par action synergique avec le muscle grand rond.

Le muscle grand rond s'insère sur le bord caudal de la scapula, sa terminaison est commune avec celle du grand dorsal sur la face médiale de l'humérus. Il est adducteur et rotateur interne du bras, c'est ainsi un agoniste des muscles grand dorsal et subscapulaire. Il est fléchisseur de l'articulation scapulo-humérale lorsqu'il agit en synergie avec le muscle deltoïde.

Le muscle subscapulaire se situe à la face médiale de la scapula contre laquelle il est moulé. Il s'insère dans la fosse subscapulaire et se termine par un tendon sur la crête du tubercule mineur de l'humérus. Il est essentiellement adducteur et rotateur interne du bras, son solide tendon terminal concourt entre autre à la stabilité de l'articulation scapulo-humérale.

432. LES MUSCLES DU BRAS

Ces muscles sont regroupés autour de l'humérus, certains d'entre eux s'insèrent sur la partie distale de la scapula et agissent donc sur l'articulation scapulo-humérale.

Le muscle biceps brachial s'attache par un fort tendon (ou corde du biceps) sur le processus supraglénoidale, il s'insère distalement sur la tubérosité du radius. C'est fléchisseur de l'avant-bras. De plus, sa corde qui permet de limiter l'extension, lui donne un rôle dans la solidarisation de l'extrémité distale de la scapula avec l'extrémité proximale du radius. Ainsi dans la locomotion, il coordonne les mouvements des articulations de l'épaule et du coude. A l'appui, il concourt avec les muscles pectoraux profonds et supra-épineux à maintenir l'ouverture de l'angle scapulo-huméral, le coude étant alors bloqué par le muscle triceps brachial.

Le muscle triceps brachial est formé de trois chefs, un long et deux courts. Chez les équidés, le chef long est le plus puissant, son origine s'étend du col jusqu'à l'angle caudal de la scapula, il se termine par un fort tendon sur la tubérosité de l'olécrâne. Les chefs courts s'insèrent sur l'humérus et se terminent sur la tubérosité de l'olécrâne. Le chef long aidé par les autres chefs est essentiellement extenseur de l'avant-bras, c'est donc un antagoniste du biceps brachial. Ainsi quand le membre est au soutien il met en jeu un levier du premier ordre et lors qu'il est à l'appui un levier du second ordre. De plus, il joue un rôle important pendant la station, en assurant l'extension de l'avant-bras. Il agit en synergie avec les muscles pectoraux et biceps brachial pour le maintien de l'ouverture de l'angle scapulo-huméral.

44. LES MUSCLES DE LA CEINTURE ET DU MEMBRE PELVIEN

441. LES MUSCLES DU BASSIN

Ces muscles sont groupés autour de l'os coxal sur lequel ils prennent origine. Ils se terminent tous sur l'extrémité proximale du fémur ; ils agissent sur l'articulation coxo-fémorale.

Les muscles fessiers sont au nombre de quatre, nous étudierons seulement le fessier moyen qui est de loin le plus vaste et le plus puissant. Il s'insère sur la face glutéale de l'aile de l'ilium, sur la crête iliaque jusque sur le ligament sacro-iliaque dorsal et sur l'aponévrose du muscle *erector spinae*. Il se termine par un tendon sur le grand trochanter du fémur. C'est un extenseur de la hanche qui agit sur le fémur comme levier interfixe ; il est ainsi un des agents les plus efficaces de la propulsion du corps. S'il prend le fémur comme point fixe il peut redresser le bassin.

442. LES MUSCLES DE LA CUISSE

Ils sont groupés autour du fémur et prennent origine soit sur cet os soit sur l'os coxal. La grande majorité d'entre eux se terminent dans la région proximale de la jambe et ils sont donc moteurs de l'articulation du genou.

Ils peuvent être divisés en trois groupes ; la région fémorale crâniale avec les extenseurs de la jambe, la région fémorale caudale avec les fléchisseurs et la région médiale formée des adducteurs de la jambe et de la cuisse.

Muscles fémoraux crâniaux se terminent tous sur la rotule, ils participent à l'extension de la jambe.

- ⇒ *Le muscle tenseur du fascia lata* est le plus superficiel. Il s'insère sur l'épine iliaque (angle de la hanche). Le fascia lata est continu avec le fascia glutéal et le fascia jambier.
- ⇒ *Le muscle quadriceps fémoral* est une masse charnue volumineuse qui se compose de plusieurs chefs. Notamment un chef long, le muscle droit de la cuisse qui s'insère sur l'acétabulum et deux chefs courts, les muscles vaste latéral et vaste médial qui ont leur origine sur le tiers proximal du fémur. Ils concourent tous les trois aux mêmes actions ; ce sont de puissants extenseurs de la jambe qui lors de la station et de la locomotion empêchent le flexion de l'articulation du genou.

Muscles fémoraux caudaux prennent leurs origines sur l'os ischium et se terminent sur la partie proximale du tibia. Ce groupe rassemble notamment quatre muscles puissants et volumineux :

- ⇒ *Le muscle glutéo-fémoral* qui s'insère sur la crête sacrale médiale et les ligaments sacro-iliaque dorsal et sacro-sciatique. Il est extenseur et abducteur du fémur lorsque le membre est au soutien, il devient extenseur de l'articulation du genou et provoque ainsi la détente de l'ensemble de la jambe.

⇒ *Les muscles biceps fémoral, semi-tendineux et semi-membraneux* qui ont leur insertion d'origine sur la tubérosité ischiatique. Ils ont tous les trois les mêmes actions ; lorsque le point fixe est le bassin ils contribuent à fléchir la jambe avec une abduction et une légère rotation externe. Lorsque que le membre est à l'appui ils contribuent à redresser le bassin et empêchent sa bascule sous l'influence du poids du corps.

Muscles fémoraux médiaux sont essentiellement des muscles adducteurs.

⇒ *Le muscle gracile* est superficiel, il s'attache sur la symphyse pelvienne et sur le tendon prépubien, il se termine sur la crête tibiale par uneaponévrose unie au fascia jambier.

⇒ *Les muscles adducteurs de la cuisse* sont profonds, ils se divisent en trois chefs. Le grand adducteur de la cuisse s'attache sur la face ventrale de l'os ischium. Il termine en deux parties, l'une sur la surface âpre du fémur et l'autre sur son épicondyle médial. Le grand adducteur est donc aussi extenseur et rotateur externe du rayon fémoral.

Cette étude de l'appareil musculaire de la région axiale nous montre qu'un nombre important de muscles peut interagir sur cet axe et de manières très variées.

Ainsi, l'action musculaire dans les mécanismes locomoteurs n'est pas aussi évidente qu'elle pourrait le paraître et les plans de coopération musculaire peuvent s'avérer très complexes.

DEUXIEME PARTIE :
BIOMECANIQUE DE LA REGION
AXIALE

La biomécanique est l'application des lois mécaniques aux structures vivantes. C'est donc par essence une science interdisciplinaire qui mêle phénomènes physiologiques et physiques.

L'intérêt d'une telle discipline est dans un premier temps fondamental : décrire la physiologie du mouvement, tout d'abord par des descriptions et des quantifications objectives des postures et des mouvements, puis par la détermination des forces mises en jeu, voir même de l'énergie produite lors d'un mouvement. Par la suite, ces connaissances peuvent trouver des applications par exemple dans l'analyse de la locomotion, des gestes sportifs ou des pathologies de la locomotion ...

Cependant, l'étude du vivant est difficilement adaptable aux moules de la mécanique, plus particulièrement au niveau des hypothèses qui sous tendent sa pensée. De même, nous verrons qu'il est difficile de connaître avec précision la valeur des constantes biomécaniques nécessaires à la mise en équation du mouvement des êtres vivants.

Par conséquent, une question essentielle reste alors d'estimer si les approximations réalisées trouvent le compromis entre mécanique et physiologie, afin que l'approche soit acceptable pour le mécanicien et reste le reflet assez proche de la réalité.

1. NOTIONS GENERALES DE BIOMECANIQUE

Afin d'aborder dans des conditions favorables l'étude de la biomécanique des mouvements, il est indispensable au préalable de présenter quelques notions de base qui nous permettront par la suite de mieux appréhender les problématiques soulevées par les approches théoriques et expérimentales.

11. DEFINITIONS

111. DEFINITION DE LA CINEMATIQUE

La cinématique s'intéresse aux mouvements en terme de déplacement, de vitesse et d'accélération. Elle se limite donc à l'effet des forces qui produisent le mouvement, son étude n'inclut pas les forces elles-mêmes.

Elle permet donc une description du mouvement.

112. DEFINITION DE LA DYNAMIQUE

Une étude dynamique est une étude cinématique dans laquelle les forces appliquées au système sont aussi considérées.

12. CHOIX DU REFERENTIEL

La trajectoire, la vitesse et l'accélération d'un point mobile sont essentiellement relatives, elles dépendent du système de référence auquel on rapporte le mouvement. D'où la nécessité de définir un repère d'espace et de temps.

Pour l'application des lois de la mécanique il faut se placer dans un référentiel Galiléen, c'est-à-dire permettant d'exprimer le déplacement « absolu » d'un point quelconque. A ce référentiel s'attache un repère constitué de trois axes de « référence » et de leur origine. En général, c'est un repère orthonormé dont les axes sont perpendiculaires les uns autres qui est utilisé.

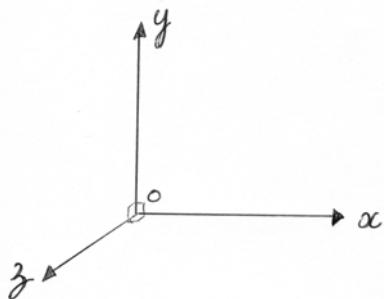


Figure n°23. Repère orthonormé direct.

Ainsi, chaque point de l'espace peut être caractérisé par un système de coordonnées cartésiennes (O, x, y, z).

Le repère terrestre est le plus utilisé des systèmes de référence dans l'espace. Il s'agit d'un repère orthonormal dont l'origine O est rattachée à la surface de la Terre. Ainsi, lorsque l'orientation est identique à celle du repère de la figure n°23, l'axe des x est l'axe longitudinal, l'axe des y est l'axe vertical et l'axe des z est l'axe transversal.

Dans le référentiel galiléen, le temps est supposé s'écouler de manière uniforme donc tout phénomène reproductible peut être utilisé comme échelle de temps.

13. DEFINITION DU SYSTEME ETUDIE

La complexité de l'application des lois de la dynamique sur le corps des mammifères rend la modélisation du système musculo-squelettique nécessaire afin de donner une représentation simplifiée du réel sur laquelle il est plus facile et plus efficace de raisonner.

La modélisation la plus simple et aussi la plus utilisée est le système des tiges articulées. (Cf. figure n°24)

Rappelons que nous posons comme hypothèse de départ que le modèle général étudié répond aux caractéristiques des solides parfaits. Ainsi, les segments corporels peuvent être assimilés à des solides indéformables, ce qui implique dans le cas d'un corps de mammifère un nombre non négligeable d'approximations qu'il conviendra de prendre en compte lors de l'exploitation des résultats.

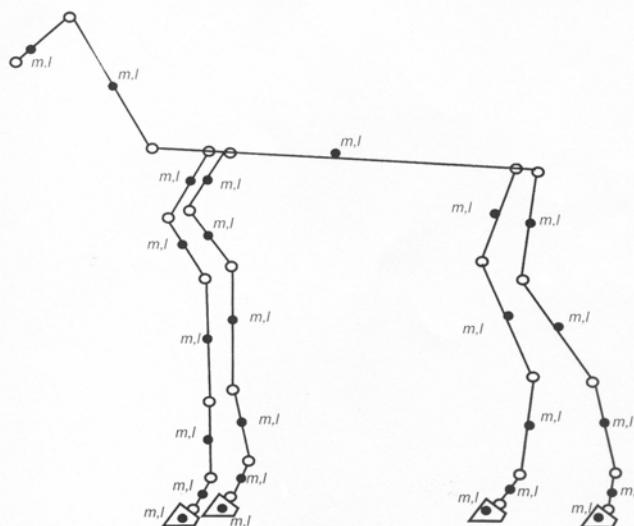


Figure n°24. Modèle des tiges rigides articulées.
(M = masse, I = centre d'inertie)

LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

131. LE CHAINON CORPOREL

Un **segment corporel** est une partie du corps formée de **pièces osseuses et des tissus mous qui l'entourent**. L'étude anatomique du corps permet de le décomposer en plusieurs segments, chaque segment peut alors être assimilé à une **tige rigide**, donc **indéformable ou « chaînon »**.

Cette assimilation implique de poser **trois conditions ou hypothèses** :

- ⇒ Les os sont considérés comme **rigides**, on admet donc que les os sont **indéformables** lorsqu'ils sont soumis aux contraintes dues aux déplacements.
- ⇒ **2. La répartition des masses** de chaque segment est considérée **constante**, c'est-à-dire que la forme des muscles est supposée rester la même au cours de la contraction et que la répartition des masses par rapport à la tige est supposée symétrique.
- ⇒ **3. Les axes de rotation** des articulations sont considérés **fixes**, les articulations sont donc assimilées à des solides remarquables.

Le degré de réalisme de ces différentes hypothèses est inégal et il convient de le prendre en compte lors de l'exploitation et de l'interprétation des études théoriques et des résultats expérimentaux.

En effet, si les pièces osseuses sont, de par leur constitution, quasiment assimilable à des solides rigides, ce n'est pas le cas des muscles dont la forme varie au cours de la contraction.

De même, à l'exception des articulations de type sphérique, les surfaces articulaires ne présentent pas de configuration géométrique simple. Leurs **axes instantanés de rotation** ne sont donc pas fixes. Ainsi, le « **centre de rotation moyen** » plus simplement appelé « **centre de rotation** » correspond à la position moyenne d'un axe instantané dans un plan donné. (Cf. figure n°25)

Selon ces diverses hypothèses, un **chaînon corporel** est alors défini comme la droite reliant les deux centres de rotation moyens d'un même segment osseux. Or, ces centres peuvent être situés soit en deçà, soit au-delà des extrémités du segment corporel. Par conséquent, la longueur du chaînon n'est pas la même que celle du segment osseux correspondant.

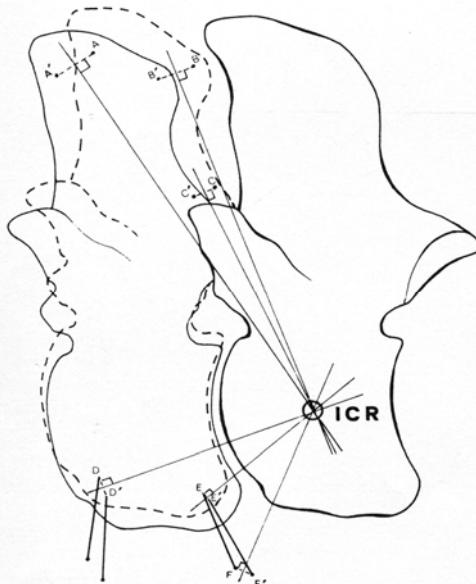


Figure n°25. Méthode géométrique utilisée pour déterminer la position des centres instantanés de rotation des vertèbres pour un mouvement donné de flexion de la colonne vertébrale.

(Denoix 1987)

132. LES LIGNES D'ACTION MUSCULAIRES

La forme et les attaches osseuses des muscles sont complexes, il convient donc de modéliser les forces musculaires lorsque l'on souhaite étudier leurs actions (Bouisset 2002).

Il est usuel de réduire le muscle à sa ligne d'action musculaire qui une droite idéale qui joint les centres de ses attaches proximales et distales.

La force musculaire est représentée par un vecteur porté par cette direction.

Les origines et les insertions musculaires sont donc réduites à des points, ce qui comporte une approximation non négligeable qui est encore plus accentuée lorsque le raisonnement se fait sur l'action d'un groupe musculaire ou « muscle équivalent ». En effet, en raison du nombre de muscles intervenant dans le mouvement, on est parfois confronté à des systèmes contenant plus d'inconnues que d'équations et que l'on ne peut donc pas résoudre. Le recours à une représentation simplifiée du système est alors envisageable ; le plus souvent la solution consiste à admettre qu'un seul muscle est représentatif du groupe dont il fait partie. Il est également possible d'évaluer la part contributive de chaque muscle dans le moment musculaire net, et ainsi résoudre le système d'équation dans toute sa complexité.

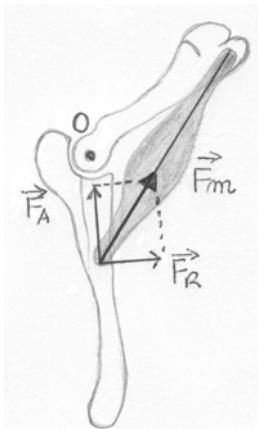


Figure n°26. Réduction d'un muscle à sa ligne d'action musculaire.

F_m est le vecteur force du muscle, F_A et F_R ses composantes articulaire et de rotation. O est l'axe de rotation articulaire.

(d'après Bouisset 2002)

133. LES LEVIERS

Les mouvements articulaires sont permis par un système de leviers. Il existe deux types : (Cf. figure n°27)

- ⇒ **Levier inter-puissant.** La force musculaire s'exerce sur le segment mobilisé, entre l'articulation et l'extrémité déplacée. Ce type de leviers a un bon rendement et les pressions articulaires sont peu élevées, mais l'amplitude de déplacement est faible.
- ⇒ **Levier inter-appui.** L'articulation sert d'appui, le déplacement se fait autour d'elle c'est à dire entre le point d'action et l'extrémité déplacée. Ce type de leviers nécessite beaucoup d'énergie et les pressions articulaires sont importantes, cependant l'amplitude de déplacement est grande.

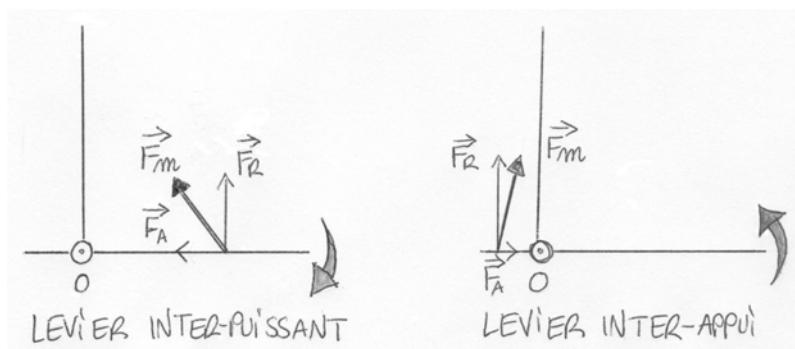


Figure n°27. Les différents types de leviers

F_m est le vecteur force du muscle, F_A et F_R ses composantes articulaire et de rotation. O est l'axe de rotation articulaire. La flèche grise indique le sens de déplacement de l'extrémité déplacée.

14. CONSTANTES BIOMECANIQUES

Chaque chaînon corporel est défini par un certain nombre de **constantes biomécaniques** nécessaires à la **mise en équation de son mouvement**. Il s'agit notamment de sa longueur, de sa masse, de la position de son centre de gravité et des moments d'inertie.

Dans le cas des corps de mammifères, il est difficile d'en connaître la valeur précise pour un individu donné. La mesure directe est longue et délicate, elle est donc rarement utilisée.

Elles sont en général estimées à partir de méthodes indirectes, soit en ayant recours à des données récoltées sur des cadavres, soit en réalisant des estimations à partir de la taille et du poids en comparaison avec des relevés effectués sur des échantillons d'individus.

141. MASSE ET LONGUEUR DES SEGMENTS CORPORELS

Le poids (P) d'un segment est le produit de sa masse (m) par l'accélération de la pesanteur (g) :

$$P = mg$$

Le poids des segments corporels peut être déterminé directement, chez le cadavre. Chez le vivant, il s'évalue à partir du volume lorsque la densité est connue.

La longueur des chaînons est définie comme la distance entre les centres de rotation moyens du segment osseux correspondant. Or, nous avons vu que ces centres peuvent être situés soit en deçà, soit au-delà des extrémités du segment corporel. Par conséquent, cette longueur n'est pas définie par deux repères anatomiques précis. L'évaluation de la position des centres moyens de rotation se fait avec plus de précision sur le cadavre. Des valeurs de références peuvent ainsi être exprimées en pourcentage de la longueur des segments osseux. Ainsi connaissant la longueur des segments anatomiques sur le vivant il devient possible d'évaluer celle des chaînons correspondants grâce à des droites de régression.

142. CENTRE DE GRAVITE

Le centre de gravité, G , d'un système de points matériels (aussi appelé centre d'inertie) est le barycentre de ses différents points A_i , affectés de leur masse, m_i . Il est défini par rapport à une origine quelconque, O , par la relation :

$$OG = \sum(m_i OA_i) / \sum m_i \quad (1)$$

On peut déterminer la localisation du centre de gravité d'un système composé de plusieurs segments corporels à partir de la position des centres de gravité et de la masse de ces derniers en appliquant la formule suivante :

$$mOG = \sum(m_i OG_i) \quad (1')$$

Par conséquent, d'après cette relation, le centre de gravité d'un système articulé n'est pas un point fixe : sa position dépend de la configuration de la chaîne articulée à chaque instant.

143. MOMENT D'INERTIE ET RAYON DE Giration

Le moment d'inertie d'un segment corporel par rapport à un axe Δ est défini par la quantité :

$$J_\Delta = \sum(m_i r_i^2) \quad (2)$$

Où r_i^2 est le carré de la distance d'un point matériel A_i , de masse m_i , à l'axe Δ .

Le moment d'inertie des chaînons corporels autour de leurs différents axes de rotation peut être déterminé expérimentalement, en général sur le cadavre.

Le théorème de Huygens permet de calculer le moment d'inertie d'un segment $J_{\Delta'}$ par rapport à un axe Δ' , parallèle à l'axe Δ qui passe par le centre de gravité du segment, lorsque l'on connaît le moment d'inertie de ce segment par rapport à Δ .

et la distance qui sépare les deux axes. Ce théorème s'exprime de la façon suivante :

$$J_{\Delta'} = J_{\Delta} + md^2 \quad (3)$$

Où m est la masse du segment et d la distance entre les deux axes.

Ce théorème permet d'expliquer pourquoi le moment d'inertie d'un corps varie lorsque sa configuration change.

15. RAPPEL DES LOIS ET PRINCIPES REGISSANT LA DYNAMIQUE

L'étude des forces qui déterminent le mouvement des systèmes matériels constitue, par définition, le domaine de la dynamique. Ces forces sont de natures diverses ; la plupart sont d'origine cosmique, seules les forces musculaires sont d'origine biologique.

Le nombre de principes de base nécessaire à l'étude des postures et des mouvements est relativement limité. Il s'agit des lois de la mécanique, aussi appelées lois de Newton dont nous allons présenter succinctement quelques éléments essentiels.

Les théorèmes de la quantité de mouvement et du moment cinétique expriment l'existence de la relation de cause à effet entre forces et mouvements. Ils constituent une expression du principe fondamental de la dynamique.

A partir de ces deux théorèmes découlent plusieurs principes dont les principes de l'inertie, de l'action et de la réaction et de la conservation de la quantité de mouvement.

Enfin, rappelons que l'application de ces lois nécessite le choix d'un repère absolu, c'est-à-dire galiléen.

151. PRINCIPE DE L'INERTIE (PREMIERE LOI DE NEWTON)

« Un système, qui n'est soumis à aucune force et/ou moment extérieur, ou bien à des forces et/ou moments qui s'équilibrivent, conserve sa vitesse en grandeur et en sens. »

En d'autres termes, l'action d'une force est nécessaire pour vaincre l'inertie que les corps opposent à une variation de leur vitesse.

Ainsi, si un mammifère doit déplacer son corps par ses propres efforts, il doit faire naître une force et/ou un moment de son environnement extérieur. De même s'il veut changer la vitesse ou la direction de son mouvement. Ceci est possible par la mise en jeu des forces musculaires, à condition que le milieu extérieur offre une réaction suffisante en raison du principe de l'action et de la réaction.

152. THEOREME DE LA QUANTITE DE MOUVEMENT (DEUXIEME LOI DE NEWTON)

Ce théorème exprime le principe fondamental de la dynamique : « *il existe une proportionnalité entre la résultante des forces extérieures appliquées au système et l'accélération de son centre de gravité* ».

$$m\Gamma_G = \Sigma F_e \quad (4)$$

où m est la masse, Γ_G l'accélération de son centre de gravité G et ΣF_e la résultante des forces extérieures. On appelle $m\Gamma_G$ la résultante dynamique.

Cette relation peut aussi s'écrire sous la forme :

$$d/dt(mV_G) = \Sigma F_e \quad (4')$$

où V_G est la vitesse du centre de gravité. mV_G est la résultante des quantités de mouvement ou résultante cinétique.

La relation 4' amène à une autre formulation du théorème : « *la dérivée de la résultante des quantités de mouvement est égale à la résultante des forces extérieures appliquées au système* ».

Par conséquent, qu'il s'agisse un solide ou d'un système de solides, il est réduit à un point pesant, son centre de gravité. Les effets de la répartition des masses sont révélés par les moments.

153. THEOREME DU MOMENT CINETIQUE

« La dérivée du moment résultant des quantités de mouvement, prise au centre de gravité du système, est égale à la résultante des moments des forces extérieures par rapport à ce point : »

$$d\sigma_G/dt = \sum M_G(F_e) \quad (5)$$

où $\sum M_G(F_e)$ est la résultante des moments en G des forces extérieures au système, σ_G est le moment résultant des quantités de mouvement (ou moment cinétique), par rapport à G , origine d'un repère d'axes fixes.

Dans le cas d'un solide rigide, son moment d'inertie est constant. S'il est animé d'un mouvement de rotation autour d'un axe fixe dans un repère galiléen, le fait d'expliciter la dérivée du moment cinétique permet d'écrire :

$$J_{G\Delta}\Theta = \sum M_G(F_e) \quad (5')$$

Où Θ représente l'accélération angulaire instantanée du solide par rapport au repère et $J_{G\Delta}$ son moment d'inertie par rapport à l'axe Δ , passant par G . le produit de ces deux grandeurs, $J_{G\Delta}\Theta$, est le moment dynamique.

L'application de ce théorème à un système de solides amène à y remplacer le moment cinétique par la somme des moments cinétiques.

154. PRINCIPE D'ALEMBERT OU PRINCIPE DE L'EQUILIBRE DYNAMIQUE

Ce principe est fondé sur la prise en considération du système des forces d'inertie.

Ainsi, on appelle la « force d'inertie » le premier terme de l'équation (4) affecté du signe -, soit $-m\Gamma_G$, et on appelle « couple d'inertie » le premier terme de l'équation (5') affecté du signe -, soit $-J_{G\Delta}\Theta$.

Cf. figure n°28.

On constate qu'il y a égalité à chaque instant entre le système de forces extérieures et celui des forces d'inertie. « Il y a équilibre à chaque instant, entre toutes les forces et moments appliqués au solide considéré, y compris la force et le couple d'inertie ».

Appliquer ce principe revient donc à réduire un problème de dynamique à un problème de statique.

De façon usuelle, le « corps libre » est l'être mécanique soumis à un ensemble de forces. Le diagramme représentant le bilan des forces appliquées à une chaîne articulée est donc appelé « diagramme de corps libre ».

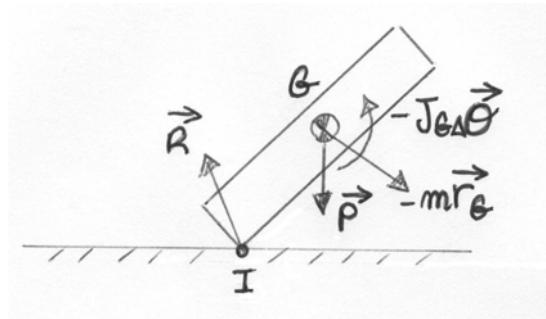


Figure n°28. Diagramme de corps libre : cas d'un solide unique.

Soit un solide unique (S) reposant sur un plan. Le solide est soumis à la réaction du sol (R), appliquée au centre des pressions, I , et à son poids (P), appliqué à son centre de gravité, G .

Γ_G est l'accélération linéaire et Θ l'accélération angulaire du solide en mouvement dans un repère (O, x, z). $-m\Gamma_G$ est la force d'inertie et $-J_{G\Delta}\Theta$ le couple d'inertie autour d'un axe fixe, Δ , perpendiculaire à (O, x, z) en G .

(d'après Bouisset 2002)

155. PRINCIPE DE L'ACTION ET DE LA REACTION

« L'action d'un solide ($S1$) sur un autre solide ($S2$) est égale et opposée à l'action de ($S2$) sur ($S1$) ».

Le système des actions peut être réduit à une résultante si le contact est ponctuel et s'il n'y a pas de frottement.

Par conséquent, un mammifère ne peut exécuter de mouvements efficaces, ni mouvoir son corps, que si le milieu extérieur offre une réaction aux mouvements des membres par rapport au corps. La force propulsive totale appliquée au corps du fait de la contraction des muscles est égale à la résultante des forces résistantes que par exemple, le sol exerce sur les pieds.

156. CONSERVATION DE LA QUANTITE DE MOUVEMENT

Une force qui agit pendant un certain intervalle de temps produit une « impulsion ». L'impulsion n'est pas liée à un déplacement ce qui la distingue fondamentalement de la notion de travail.

L'impulsion correspond donc au produit de la force, ou de son moment, par sa durée d'application.

Dans le cas d'une translation, l'impulsion est dite linéaire. Elle est alors donnée par l'intégration de la relation 4' entre les instants t_2 et t_1 :

$$F_e \Delta t = m \Delta V_G \quad (6)$$

Où $F_e \Delta t$ est l'impulsion (en N.s) et la variation de la quantité de mouvement du centre de gravité (en kg.m/s) pendant l'intervalle de temps Δt ($\Delta t = t_2 - t_1$)

De même dans le cas d'une rotation, l'impulsion est dite angulaire et elle est donnée par intégration de la relation 5' :

$$M_G(F_e) \Delta t = J_{G\Delta} \Delta \Theta \quad (6')$$

Où $M_G(F_e) \Delta t$ est l'impulsion (en N.m/s) et $J_{G\Delta} \Delta \Theta$ la variation de la quantité de mouvement angulaire (en kg.m².rad/s) par rapport au centre de gravité.

L'impulsion, linéaire ou angulaire, est donc la cause du mouvement volontaire et la quantité de mouvement (ou moment), linéaire ou angulaire, en est sa manifestation.

Il résulte des relations 6 et 6' que si l'impulsion est constante, le moment est constant. Alors il y a « conservation de la quantité de mouvement ». Ce cas se présente notamment **pendant la locomotion**, lors des phases aériennes consécutives à des phases d'appui. Ainsi **l'impulsion linéaire lors de la phase d'appui conditionne la quantité de mouvement mise en jeu lors de la suspension** et comme l'impulsion est le produit de la force, en l'occurrence de la réaction du sol, par le durée de son application, toute augmentation de l'une ou de l'autre doit augmenter la performance. (Bouisset 2002)

16. BILAN DES FORCES S'EXERCANT SUR UNE CHAINE ARTICULEE

L'étude dynamique nécessite un bilan des forces qui lui sont appliquées. Les forces musculaires malgré leur rôle unique ne suffisent pas à elles seules pour rendre compte de la dynamique du mouvement.

161. LES DIFFERENTES CATEGORIES DE FORCES

On distingue quatre catégories de forces agissant sur un système de solides articulés comme le corps des mammifères :

- ⇒ **Les « forces données »** : la pesanteur et les résistances à l'avancement dans l'air ou dans l'eau, éventuellement négligeables.
- ⇒ **Les « forces de liaison intérieures »** : notamment les forces de réactions articulaires (tension ligamentaire, frottement intra-articulaire, forces transmises par les surfaces articulaires...)
- ⇒ **Les « forces de liaisons extérieures »** : réaction du sol sur les surfaces à l'appui et les frottements.
- ⇒ **Les « forces musculaires »**, ce sont elles qui sont responsables de la rotation des segments corporels.

162. FORCES EXTERIEURES ET FORCES INTERIEURES

Dans les équations 1.8 et 1.9, ce sont les forces extérieures au système mécanique considéré qui sont prises en compte. Par définition, ces forces sont celles qui proviennent de causes extérieures au système.

Ces considérations s'appliquent au corps des mammifères, système de solides articulés. Ainsi, dans le cas d'une expression globale de sa dynamique, les forces extérieures se limitent à la pesanteur et la réaction du sol si les résistances au déplacement dans l'air ou dans l'eau sont négligées. En effet, quand le corps est

considéré dans son ensemble, les forces de liaisons articulaires et les forces musculaires constituent des forces intérieures.

Cependant, si les forces musculaires ne sont pas prises en compte ce sont bien elles qui rendent le déplacement du centre de gravité du corps possible. Mais si la contraction des muscles produit bien des mouvements segmentaires, elles ne provoqueront un déplacement du centre de gravité corporel que si le milieu extérieur offre une résistance suffisante.

Enfin, dès lors que les mouvements de seulement une partie du corps sont étudiés, les forces de liaisons et les forces musculaires agissant à ce niveau deviennent des forces extérieures à la chaîne articulée considérée. Il convient alors d'ajouter aux forces et moments extérieurs les forces et les moments intérieurs résultants des actions de liaisons ; ces derniers sont alors « extériorisés ».

163. FORCES INTERSEGMENTAIRES

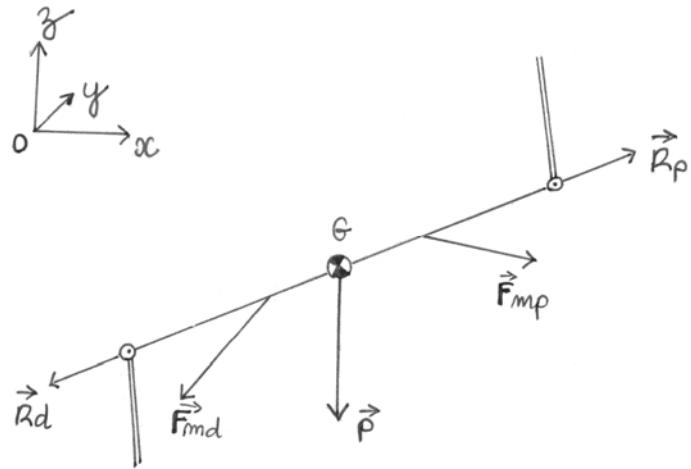
Il ne faut pas confondre les actions de réactions articulaires et les actions réellement transmises par les articulations, appellées « actions intersegmentaires ».

La force intersegmentaire est obtenue en combinant les forces de réactions articulaires et les composantes articulaires de forces musculaires qui tendent à appliquer les surfaces articulaires l'une contre l'autre.

164. ETABLISSEMENT D'UN DIAGRAMME DE CORPS LIBRE

Nous allons voir les étapes qui mènent du bilan des forces intérieures de liaison au niveau des articulations, à l'établissement du diagramme de corps libre d'un chaînon quelconque.

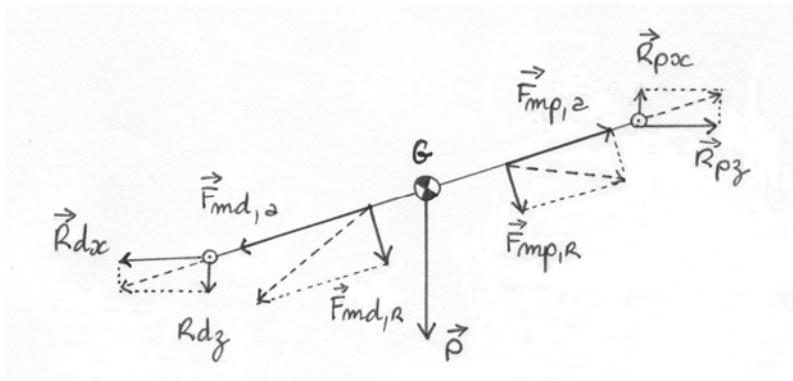
1641. EFFET DE L'EXTERIORISATION DES FORCES INTERIEURES



Soit un chaînon quelconque, G étant son centre de gravité.

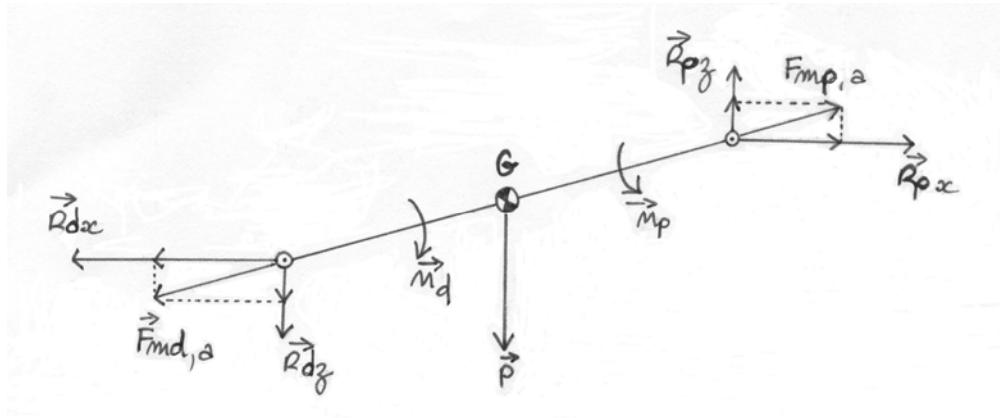
Aux forces (et moments) extérieures appliquées au segment, en l'occurrence ici son poids (P), on ajoute les forces (et les moments) des forces de liaison appliquées au niveau des articulations proximales (indice p) et distales (indice d) : il s'agit des forces musculaires (F_m) et des forces de liaison articulaires (R).

1642. DECOMPOSITION DES FORCES EN LEURS COMPOSANTES



On décompose chacune des forces musculaires en ses composantes, articulaire ($F_{m,a}$) et de rotation ($F_{m,r}$). On projette également les forces de liaison articulaires sur les directions Oz et Ox , soit deux composantes pour chacune (R_z et R_x).

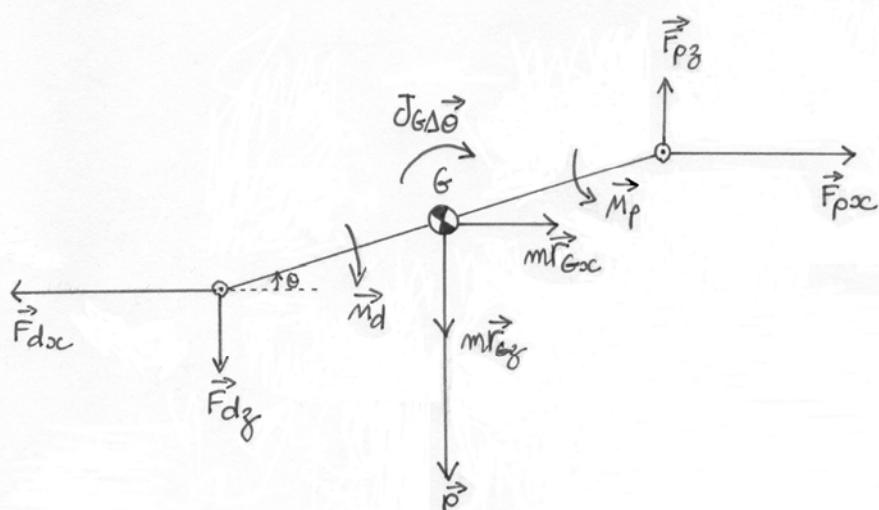
1643. DECOMPOSITION DES ACTIONS MUSCULAIRES EN UNE FORCE ET UN MOMENT



Les composantes articulaires des forces musculaires sont des vecteurs glissants. Ainsi ils sont appliqués aux extrémités proximales et distales. Leurs projections sur les directions Oz et Ox peuvent être combinées avec les composantes Rx et Rz des forces de liaisons articulaires, ce qui donne les composantes verticale et horizontale des forces intersegmentaires.

Les composantes de rotation des forces musculaires exercent un moment de rotation par rapport à chacune des extrémités du chaînon ; Mp et Md.

1644. DIAGRAMME DU CORPS LIBRE DU CHAINON



Cette étape aboutit au diagramme de corps libre du chaînon, grâce à l'addition des forces d'inertie. Le diagramme permet de visualiser la disposition des forces intersegmentaires selon leurs projections sur les directions Oz et Ox (Fdx, Fdz, Fpx et Fpz)

165. EQUATIONS GENERALES DU MOUVEMENT D'UN CHAINON

Dans le cas le plus général où l'ensemble du corps est en mouvement, chaque chaînon agit comme un corps libre, sous l'influence des actions gravitaires et intersegmentaires. A partir du théorème de la quantité de mouvement :

[Cf. 2^{ième} partie, § 152, équation (4)]

$$m\Gamma_G = F_p + F_d + P$$

F_p et F_d étant les forces intersegmentaires agissant aux extrémités proximales et distales, Γ_G l'accélération du centre de gravité (G), m la masse et P le poids du chaînon.

Ces équations permettent théoriquement de calculer les forces intersegmentaires et les moments musculaires (en y appliquant le théorème du moment cinétique) au niveau des articulations considérées. Le calcul se fait de proche en proche à partir du chaînon le plus distal, par une méthode de « dynamique inversée ». Pour cela il faut cependant disposer des données cinétiques, cinématiques et des constantes biomécaniques des chaînons.

Cf. figure n°29.

166. L'ANALYSE DYNAMIQUE INVERSEE ; EVOLUTION DES CONNAISSANCES EN BIOMECHANIQUE.

Les lois de la dynamique permettent de prédire les mouvements résultants de forces connues ou d'estimer les forces qui sont la cause d'un mouvement observé, il s'agit alors d'analyse dynamique inversée.

L'analyse dynamique inversée traite le système locomoteur comme un système de tiges rigides articulées où l'action musculaire est représentée par des moments moteurs à chaque articulation. Elle combine les données cinématiques et des plateaux de forces pour dériver les moments articulaires tout au long d'un cycle de mouvement.

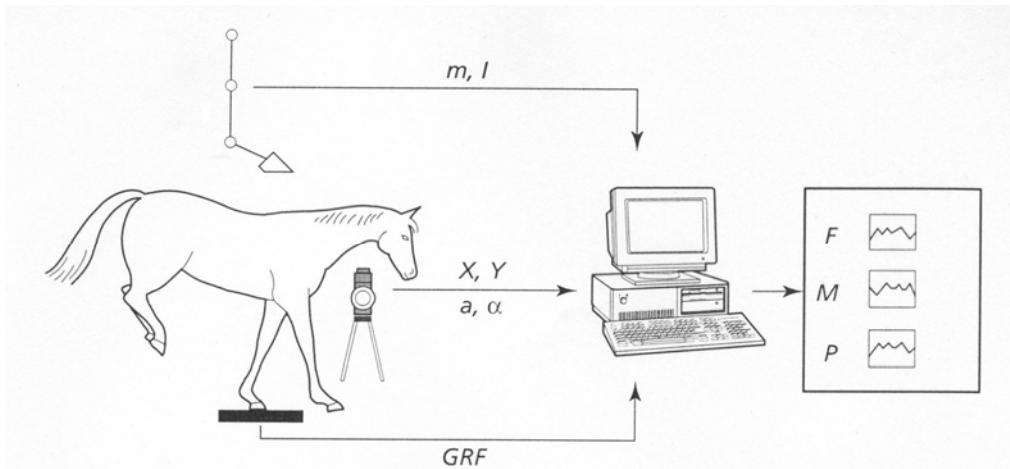


Figure n°29. Analyse dynamique inversée utilisant un modèle de tiges rigides articulées.
 (Meershoek et van den Bogert 2001)

m = masse du segment, l = centre de gravité

X, Y, a et α = coordonnées cartésiennes et angles articulaires

GRF = réaction du sol (ground reaction force)

F , M et P = forces, moments et puissances évalués par un système informatique à partir des données cinématiques, cinétiques et des plateaux de forces.

Il est évident que les résultats de telles études sont sensibles aux protocoles utilisés pour récolter les données des analyses. Or, les segments corporels du cheval ne répondant pas aux caractéristiques des solides parfaits, ces données peuvent donc seulement être des approximations. Ainsi, cette méthodologie reste acceptable tant que son principe est bien compris et que les résultats des différentes études sont comparés entre eux afin que ces derniers ne soient pas interprétés de façon abusive (Meershoek et van den Bogert 2001).

2. METHODES EXPERIMENTALES DE DETERMINATION DES CONSTANTES BIOMECANIQUES

21. DISSECTION

La dissection est une étape préalable nécessaire aux études biomécaniques.

En effet, elle permet de définir avec un maximum de précision une partie des constantes biomécaniques des chaînons corporels, notamment la masse, le volume et la mesure du déplacement des axes de rotation articulaires qui permettent par la suite de déduire la longueur et la position du centre de gravité des chaînons corporels. C'est aussi la seule méthode de détermination des insertions musculaires.

De plus, l'observation des structures permet en partie d'en déduire la fonction. Ainsi, l'anatomie fonctionnelle enrichie d'expériences sur pièces de dissection et de calculs mathématiques permet d'aboutir à des théories biomécaniques avant que la technique soit capable de les valider par l'expérimentation sur le vivant.

22. VARIABLES CINEMATIQUES

La cinématique ne s'intéresse pas aux forces qui déterminent le mouvement, mais au mouvement en tant que tel. Les variables cinématiques qui permettent de décrire le mouvement sont le déplacement, la vitesse et l'accélération.

Ainsi, elle apporte des informations sur le mouvement articulaire.

221. METHODE DE MESURES DIRECTES

Ces méthodes sont fondées sur l'utilisation de transducteurs permettant de détecter les déplacements (potentiomètres et goniomètres) et les accélérations (accéléromètres).

Ces techniques permettent d'évaluer les déplacements par les mesures des angles des articulations et les accélérations d'un segment corporel en fonction du mouvement.

222. METHODE DE MESURES INDIRECTES

Ces méthodes consistent dans l'enregistrement, sur un support d'images du mouvement. Divers techniques d'imagerie peuvent être utilisées ; photographie, cinématographie.... Il est désormais recommandé d'utiliser au moins trois caméras synchronisées pour réaliser des enregistrements en trois dimensions.

Toutes ces méthodes nécessitent que des mires ou marqueurs soient disposées sur le corps en des points anatomiques remarquables, dont on souhaite connaître le déplacement.

En dépit de leur caractère familier, l'utilisation de ces techniques à des fins scientifiques pose de nombreux problèmes qui font que dans la pratique l'obtention des résultats exploitables n'est pas toujours aisée et fait appel à des technologies pointues.

A partir des données récoltées par ces différentes techniques, il est alors possible de disposer d'un « diagramme en bâton » ou kinogramme représentant le déplacement de la chaîne articulée, épure géométrique du déplacement de chacun des points considérés. (Cf. figure n°30)

Il est également possible de quantifier les trajectoires par divers procédés. Cette étape requiert un système d'axes de références et des techniques appropriées de conversion et de traitement des données. Les vitesses et les accélérations peuvent être déterminées par dérivation. Le traitement par informatique des données a grandement allégé ces procédures.

N.B. La position instantanée du centre de gravité du corps peut aussi être déterminée lorsque celles des centres de gravité partiels sont connues.

Aujourd'hui la cinématique fournie toujours de nouvelles données à la recherche fondamentale, mais elle trouve aussi des applications pratiques, notamment dans l'évaluation des troubles locomoteurs chez le cheval. (Pourcelot et coll. 1996)

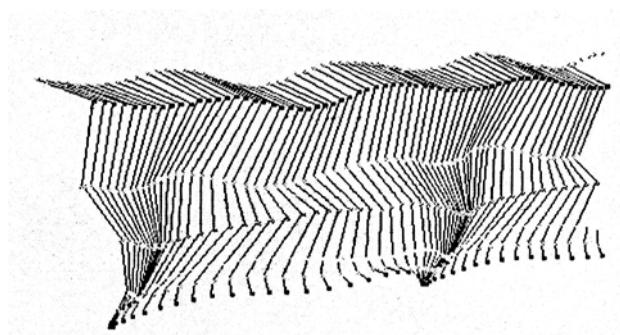


Figure n°30. kinogramme d' un postérieur au trot.

(D'après Pourcelot et coll. 1996)

223. APPLICATION A L'ETUDE DE LA LOCOMOTION DES EQUIDES

Les études cinématiques portant sur la locomotion, se sont développées en grande partie grâce aux progrès réalisés dans le domaine de l'informatique qui ont permis une récolte et un traitement des données plus efficace et approfondi.

Ainsi, dans les années 70, un groupe de chercheurs suisses (Fredricson et coll. 1980) met au point une méthode permettant d'étudier les variables des mouvements chez les trotteurs attelés. Pour cela ils ont utilisé la cinématographie à grande vitesse permettant de filmer jusqu'à 600 images par seconde, associée à un système informatique chargé de récolter, convertir et traiter les données filmées.

Les premiers travaux utilisant une telle technique, se sont d'abord effectués sur piste à l'hippodrome. Ils ont à l'époque permis d'approfondir la recherche fondamentale sur la locomotion des équidés en analysant les caractéristiques linéaires et temporelles de la foulée de trot de course avec une précision et une rigueur encore jamais atteinte. (Drevemo et coll., 1980a, b, Fredricson et coll. 1980)

Ces techniques ont trouvé par la suite des applications dans le domaine de la recherche sur les troubles et les pathologies de l'appareil locomoteur et sur les performances du cheval athlète (Pourcelot et coll. 1996).

Cependant, si elle s'adapte particulièrement bien à l'analyse des mouvements des membres, son application à la colonne vertébrale pose de nombreuses difficultés techniques en raison de la complexité et de la faible amplitude des mouvements.

Dans le milieu des années 80, l'adaptation du tapis roulant à l'exercice du cheval a ouvert de nouvelles perspectives dans l'approche cinématique. En effet, il a été montré que la locomotion montrait des caractéristiques similaires sur piste et sur tapis roulant. (Fredricson et coll. 1983)

Ainsi, l'étude cinématographique en salle, en offrant notamment une meilleure standardisation des protocoles et des possibilités d'appareillage avec des accessoires plus sophistiqués, a permis entre autre d'aborder la cinématique de la colonne vertébrale.

23. VARIABLES DYNAMIQUES

Le domaine de la dynamique constitue par définition l'étude des forces qui déterminent le mouvement.

Les forces gravitaires (le poids) et les forces de liaisons extérieures (réaction du sol) peuvent être mesurées directement. Par contre les forces de liaisons intérieures (réactions articulaires) et le moment musculaire ne peuvent être déterminés que de façon indirecte, à partir des équations du mouvement des segments corporels à condition que l'on dispose des données cinématiques et cinétiques nécessaires.

231. PLATEAUX DE FORCES

La mesure de la force exercée par un corps sur son environnement, est réalisée par un transducteur de force. Ce dernier à partir de principes de détection variés, délivre un signal, en général électrique, proportionnel à la force qui lui est appliquée.

Les plateaux (ou plates-formes) de forces se présentent sous des formes et des dimensions variées mais ils ont tous le même principe : une force externe appliquée sur un plateau est transmise à des transducteurs par l'intermédiaire d'éléments mécaniques. L'interprétation des données peut être fondée sur les théorèmes de la quantité du mouvement et du moment cinétique, ce qui évite alors toute hypothèse simplificatrice, dans la mesure où elle ne nécessite pas la modélisation du corps par un système de tiges articulées. [Cf. 2^{ème} partie, § 152 et 153]

Cette méthode permet de mesurer de façon directe le poids et les forces de réaction du sol.

232. ELECTROMYOGRAPHIE (EMG)

L'étude de l'activité électromyographique est un moyen indirect d'estimer la force musculaire. C'est actuellement l'unique méthode permettant d'évaluer *in vivo* l'activité musculaire pendant la locomotion d'où son grand intérêt dans l'approche expérimentale de la biomécanique. En effet, les données récoltées par ces techniques permettent en association avec les données cinématiques de déterminer le rôle exact des muscles et ainsi de mieux comprendre les mécanismes mis en jeu lors de la locomotion. Cependant, cette technique ne permet pas à l'heure actuelle de fournir des valeurs quantitatives assez fiables et reproductibles pour évaluer la puissance du travail musculaire.

2321. APPLICATION A L'ETUDE DE LA LOCOMOTION DES EQUIDES

Pour détecter l'activité électrique d'un muscle, deux techniques sont possibles : soit utiliser des électrodes de surface fixées sur la peau, soit utiliser des électrodes intramusculaires insérées dans le muscle. Les électrodes de surface détectent une activité globale (EMG global), seule l'activité des muscles superficiels est alors estimée. Avec les électrodes intramusculaires, en fonction de la sélectivité des électrodes, il est possible d'enregistrer soit un EMG global, soit un EMG élémentaire c'est à dire des potentiels d'action d'unités motrices. Par rapport à la méthode cutanée, la méthode invasive permet donc d'étudier des plans musculaires plus profonds mais elle présente l'inconvénient de devoir franchir la barrière cutanée. Quant aux électrodes de surfaces, elles présentent tout comme le marquage cutané pour les études cinématique, l'inconvénient majeur de pouvoir se déplacer par rapport aux structures sous jacentes. Ainsi, à cause des glissements cutanés il est parfois possible que le signal enregistré ne soit pas celui du muscle étudié au départ.

La quantification de l'EMG soulève certains problèmes qui ne doivent pas être sous estimés. En effet, l'intensité du signal électromyographique dépend de multiples facteurs techniques (préparation adéquate de la surface cutanée, localisation des électrodes...) mais aussi du muscle considéré, du sujet et varie d'un examen à un autre. Une normalisation est donc nécessaire pour pouvoir comparer les résultats obtenus sur différents muscles d'un même sujet, d'un examen à un autre et d'un sujet à un autre (Bouisset 2002).

Ainsi, l'EMG permet d'apprécier le niveau d'excitation d'un muscle donné et de caractériser la mise en jeu d'un groupe de muscles par rapport à un autre lors de l'exécution des mouvements, c'est-à-dire le « plan de coopération musculaire » ou « schéma musculaire » (« muscular pattern » des anglo-saxons)

2322. LES DIFFERENTES « CONTRACTIONS » MUSCULAIRES

Les enregistrements électromyographiques ont montré que les muscles ne sont pas seulement activés quand ils se raccourcissent mais aussi lorsqu'ils s'allongent.

La contraction est dite **concentrique** quand le muscle se raccourcit ; les deux extrémités musculaires se rapprochent. Ce type de contraction intervient dans les mécanismes d'ouverture des angles articulaires notamment lors de la propulsion.

La contraction est dite **excentrique** quand le muscle s'allonge et donc que les deux extrémités musculaires s'éloignent. Ce type de contraction intervient dans des actions de contrôle et d'amortissement des mouvements.

Le travail en contraction excentrique participe de façon importante au développement de la puissance du muscle et à son efficacité dans la détente (Denoix 1988).

3. ANALYSE BIOMECANIQUE DE LA REGION AXIALE

A ce jour, la biomécanique de la colonne vertébrale n'est pas encore totalement élucidée chez les quadrupèdes et la recherche ne cesse d'évoluer dans ce domaine.

Si de nombreux auteurs ont abordé la biomécanique de la colonne thoraco lombaire, celle de la colonne cervicale n'a été que rarement traitée.

De plus, les importantes masses musculaires qui recouvrent ces régions rendent leurs investigations peu aisées.

Ainsi la littérature n'apporte que des informations partielles et les principes établis sont parfois sujet à controverse.

Nous proposons dans cette partie de faire une synthèse des connaissances acquises sur le sujet en l'abordant par une démarche tour à tour descriptive et expérimentale.

31. RAPPEL DES BASES BIOMECANIQUES APPLIQUEES A LA REGION AXIALE

311. CHOIX DES REPERES D'ESPACE ET DE TEMPS

Les déplacements des vertèbres sont le plus souvent décrits comme des rotations et des translations dans les trois dimensions de l'espace, les mouvements de translation sont le plus souvent négligés.

Toute étude devra donc être réalisée dans un référentiel Galiléen, auquel on s'attachera en général, un repère orthonormal direct ou non. En fonction des besoins de l'analyse, l'origine du repère pourra définir soit un repère terrestre soit un repère segmentaire.

Nous avons vu que tout évènement reproductible peut être utilisé comme échelle de temps. Par définition une foulée peut donc correspondre à une unité de temps.

3111. CARACTERISTIQUES DE LA FOULEE

La foulée correspond à un cycle complet de locomotion. Elle se compose donc de l'ensemble des mouvements compris entre deux évènements identiques successifs. Généralement, c'est le poser d'un membre qui est pris comme repère spatio-temporel.

31111. LES DIFFERENTES PHASES DE LA FOULEE

L'**appui** et le **soutien** sont les deux temps principaux du cycle d'une foulée pour un membre. L'appui comprend une phase d'**amortissement** puis une de **propulsion**. Le soutien comprend une phase de **rétraction** suivie d'une de **protraction**.

Quatre évènements permettent de repérer ces différents temps avec précision ; (Cf. figure n°31)

Le poser du membre : instant où le talon reprend contact avec le sol.

Le mi appui : instant où le métacarpien/(tarsien) est perpendiculaire au sol.

La levée du membre : instant où la pince du sabot quitte le sol.

Le mi soutien : les articulations du boulet et du grasset sont alignées suivant une droite passant par la verticale.

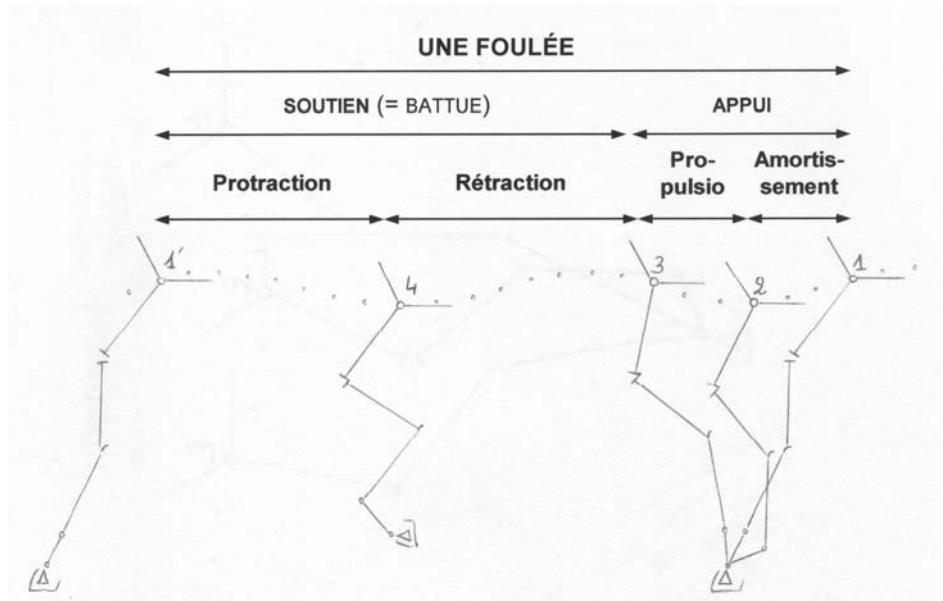


Figure n°31. Les différentes phases de la foulée d'un membre postérieur.

1 : poser, 2 : mi appui, 3 : levée, 4 : mi soutien.

(d'après Robert C. 2000)

3112. LES CARACTERISTIQUES TEMPORO-SPATIALES DE LA FOULEE

Chaque foulée peut être assimilée à un mouvement linéaire caractérisé par une longueur et une durée. La longueur correspond à la distance entre deux empreintes successives d'un même membre. La durée est définie comme l'intervalle de temps entre n'importe quel évènement identique successif du cycle ; en général le poser d'un membre.

Les études portant sur les caractéristiques de la foulée de trot ont montré qu'il y avait de faibles variations dans le modèle de locomotion présenté par un individu. Ainsi, à vitesse constante, la durée totale et la longueur de la foulée et la durée de la phase d'appui ressortent comme des caractères très stables pour un même cheval (Drevemo et coll. 1980a, Faber et coll. 2002).

Cependant, les variations entre les individus sont plus marquées et on observe différentes combinaisons de longueur et de durée de foulée pour atteindre une vitesse donnée, ce qui peut s'expliquer en grande partie par des différences anatomiques et de conformation (Faber et coll. 2002).

Toutefois pour une vitesse donnée, les durées relatives des différentes phases de la foulée semblent être assez stables entre les individus.

(Drevemo et coll. 1980a, b)

Par conséquent, en s'appuyant sur les caractères spatio-temporels cycliques et réguliers de la foulée à vitesse constante, il est donc possible d'utiliser une foulée comme unité du repère de temps. Ainsi, dans les différentes expérimentations *in vivo*, et plus particulièrement pour les études cinématiques et électromyographiques, les durées sont en général exprimées en pourcentage de la foulée. Pour cela, simultanément aux informations récoltées pour les besoins des expériences, des relevées cinématographiques et/ou accélérométriques permettent de déterminer les durées relatives des différentes phases de la foulée.

(Drevemo et coll. 1980a, Degueurce 1995, Audigié et coll. 1999, Faber et coll. 2000)

3112. LES ALLURES NATURELLES

Pour se déplacer, les quadrupèdes bougent leurs membres dans un certain ordre caractéristique d'une allure. Les allures naturelles ou instinctives sont celles que le cheval prend spontanément lorsqu'il est en liberté (pas, trot et galop). Par opposition, il existe des allures artificielles ou acquises qui sont obtenues soit par le dressage (airs d'école) soit du fait d'une souffrance ou d'une mauvaise utilisation (allures défectueuses).

Nous n'aborderons ici que les allures naturelles.

31121. RAPPELS ET DEFINITIONS

Un temps correspond à la durée qui sépare deux posers successifs,

Une foulée détermine la durée qui sépare deux posers successifs d'un même membre.

Un temps de suspension (ou de projection) est une période pendant laquelle aucun membre n'est à l'appui.

Dans une **allure marchée** il y a toujours au moins un pied au sol (pas) alors que dans une **allure sautée** il y a un ou plusieurs temps de suspension (trot, galop).

Une allure est **symétrique** lorsque les mouvements de chacun des membres droits sont répétés ensuite par son congénère de gauche, une allure est **dissymétrique** dans le cas contraire.

Certains parlent d'**allure basculée** quand les mouvements du balancier cervico-céphalique y sont importants.

Pour décrire le jeu des membres, ces derniers sont associés par **bipèdes**:

Bipède latéral droit = antérieur et postérieur droit.

Bipède latéral gauche = antérieur et postérieur gauche.

Bipède diagonal droit = antérieur droit et postérieur gauche.

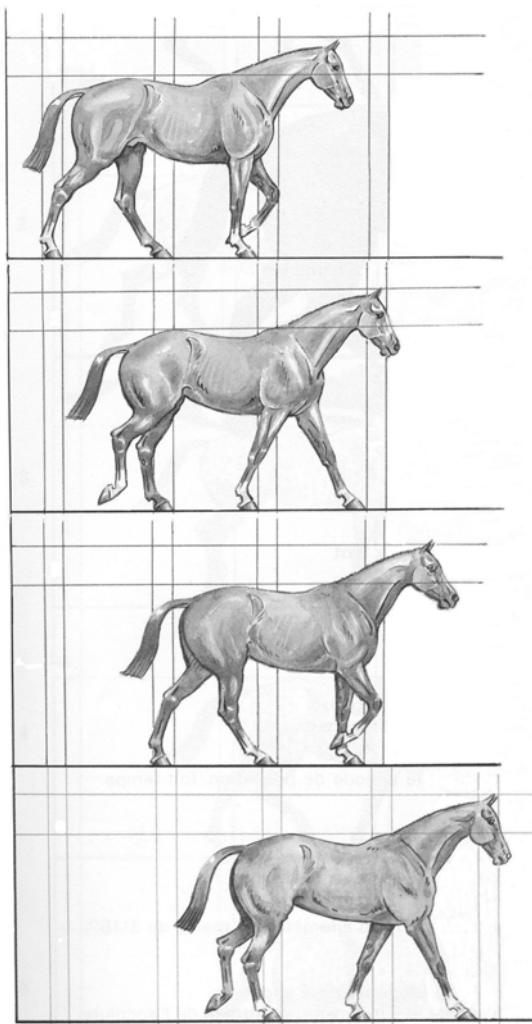
Bipède diagonal gauche = antérieur gauche et postérieur droit.

31122. LE PAS

Le pas est une allure marchée, symétrique à quatre temps égaux.

Les temps trois et quatre sont les symétriques des temps un et deux par rapport au plan médian.

Pour certains, aussi que s'est une allure « basculée » car les mouvements du balancier cervico-céphalique y sont particulièrement prononcés.



Premier temps :

Poser du postérieur gauche.

Le postérieur droit est en fin de propulsion, l'antérieur droit à mi-appui et l'antérieur gauche à mi-soutien.

Deuxième temps :

Poser de l'antérieur gauche.

L'antérieur droit est en fin de propulsion, le postérieur gauche à mi-appui et le postérieur droit à mi-soutien.

Troisième temps :

Poser du postérieur droit.

Quatrième temps :

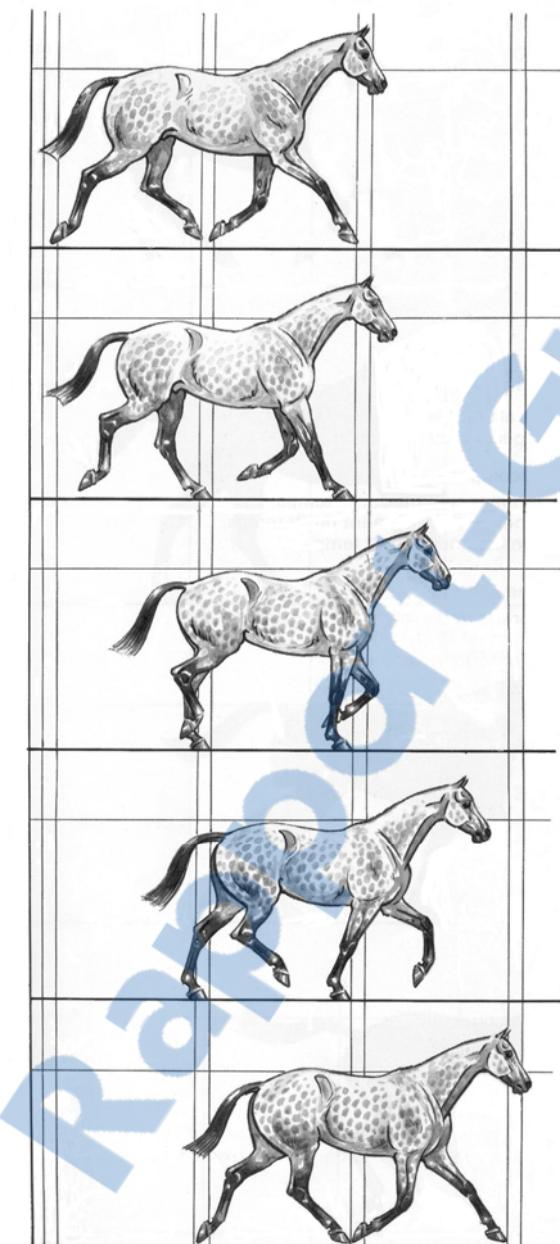
Poser de l'antérieur droit.

Figure n°32. Les quatre temps d'une foulée de pas

(d'après le manuel officiel de préparation aux examens fédéraux d'équitation. Tome 2. *les examens d'argent*. Edition Lavauzelle, 1988)

31123. LE TROT

Le trot est une allure sautée, symétrique à deux temps égaux par bipèdes diagonaux et symétrique par rapport au plan médian. Chaque temps est composé de trois phases et il est séparé du suivant par un temps de suspension.



Temps de suspension

Premier temps :

Poser et amortissement du bipède diagonal droit

Milieu de l'appui du bipède diagonal droit.

Milieu du soutien du bipède diagonal gauche

Propulsion et lever du bipède diagonal droit

Temps de suspension

Figure n°33. Premier temps d'une foulée de trot.

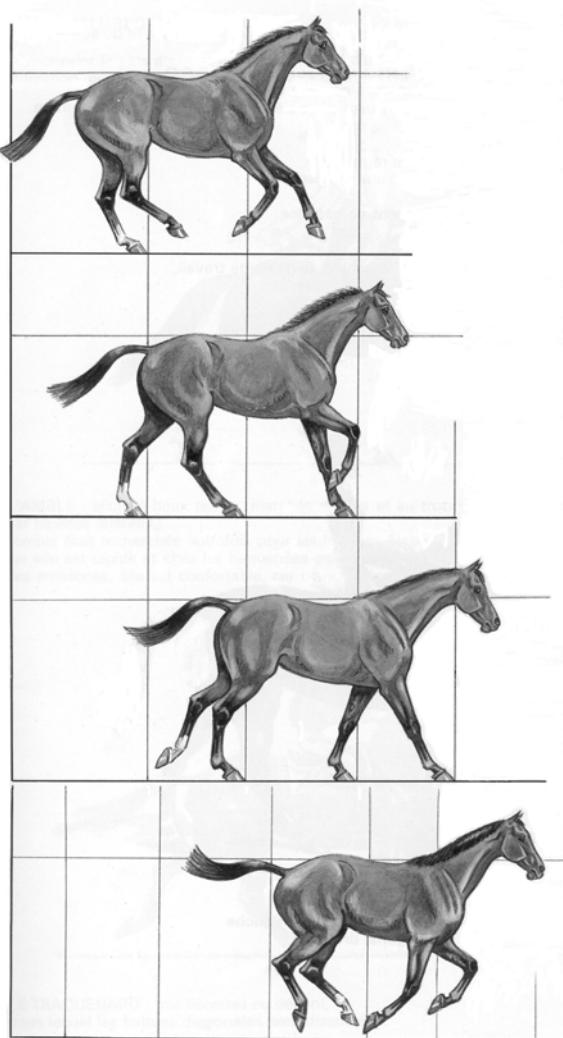
(d'après le manuel officiel de préparation aux examens fédéraux d'équitation. Tome 2. *les examens d'argent*. Edition Lavauzelle, 1988)

31124. LE GALOP

Le galop est une allure sautée, dissymétrique à trois temps et un temps de suspension. De même que pour le pas, certains parlent d'allure basculée.

Une foulée de galop se décompose de la façon suivante :

- ⇒ poser du postérieur poursuivant (début du premier temps)
- ⇒ poser du bipède diagonal, postérieur meneur et antérieur poursuivant (début du deuxième temps)
- ⇒ poser de l'antérieur meneur (début de troisième temps)
- ⇒ temps de suspension.



Premier temps :

Poser du postérieur gauche
(postérieur poursuivant).

Deuxième temps :

Poser du bipède diagonal gauche
(antérieur poursuivant et postérieur meneur).

Troisième temps :

Poser de l'antérieur droit (antérieur meneur).

Temps de suspension.

Figure n°34. Les trois temps d'une foulée de galop à droite.

(d'après le manuel officiel de préparation aux examens fédéraux d'équitation. Tome 2. *les examens d'argent*. Edition Lavauzelle, 1988)

Un cheval galope du côté de son bipède latéral meneur, le bipède latéral meneur se posant plus crânialement que son homologue controlatéral ; le bipède latéral poursuivant. Ainsi, un cheval galope à droite lorsque le bipède latéral droit prend de l'avance sur le bipède latéral gauche et une foulée de galop à droite se décompose de la façon suivante :

- ⇒ poser du postérieur gauche ou postérieur poursuivant (début du premier temps)
- ⇒ poser du bipède diagonal gauche, postérieur meneur et antérieur poursuivant (début du deuxième temps)
- ⇒ poser de l'antérieur droit ou antérieur meneur (début de troisième temps)
- ⇒ temps de suspension

Inversement pour le galop à gauche.

312. DEFINITION DU SYSTEME ET MODELISATION

Les vertèbres étant articulées les unes aux autres, le plus petit segment mobile de la colonne vertébrale (« segment motion » des anglo-saxons) constituant une unité structurelle et fonctionnelle est donc constitué par deux vertèbres successives et des tissus mous interposés. (Haussler 1999a, Denoix 1999a)

Chaque complexe articulaire intervertébral, n'est cependant le siège que de déplacements limités. C'est donc en s'ajoutant aux mouvements des segments voisins, que ces déplacements arrivent à ployer de manière conséquente la colonne vertébrale considérée dans son ensemble.

De même que pour le reste du corps, l'application des lois de la dynamique à la colonne vertébrale rend sa modélisation nécessaire. Dans ce but, elle sera notamment assimilée à un système de tiges articulées.

En effet, nous venons de voir que par définition, une vertèbre correspond à un segment corporel tel que nous l'avons déjà décrit. Elle est donc assimilable à une tige rigide et indéformable ou « chaînon », ce qui implique néanmoins de poser les trois hypothèses simplificatrices citées. [Cf. 2^{ème} partie, § 131]

Il reste évident que devant le nombre important de chaînons que comprend ce système de tiges articulées, la solution reste encore très fastidieuse à calculer. Par conséquent, selon les études abordées un chaînon pourra être formé par un groupe de vertèbres, tout en gardant à l'esprit qu'une réduction trop importante du nombre de chaînons risque d'affecter la précision des résultats. Ainsi, le modèle présenté dans la figure n°24 [Cf. 2^{ème} partie, § 13], qui ne comporte que deux segments pour l'ensemble de la colonne vertébrale (un segment cervical et un thoraco-lombaire) n'est pas approprié pour l'étude particulière de la région

axiale. Enfin, nous verrons par la suite que la division de la colonne vertébrale en différents chaînons ne se fait pas de façon arbitraire, elle doit entre autre tenir compte des zones à mobilité particulière ; comme les charnières thoraco-lombaire, lombo-sacrée et cervico-thoracique.

313. NATURE DES MOUVEMENTS

En théorie, six types de mouvements peuvent prendre place dans chaque articulation intervertébrale (Townsend et coll. 1983) :

- ⇒ Une **flexion ou une extension** dans un plan vertical
- ⇒ Une **latéro-flexion** dans un plan horizontal
- ⇒ Une **rotation axiale** autour d'un axe longitudinal
- ⇒ Des **cisaillements transverses**
- ⇒ Des **compressions ou des tensions longitudinales**
- ⇒ Des **cisaillements verticaux**

Ces déplacements sont en général décrits comme des rotations et des translations dans les trois dimensions de l'espace.

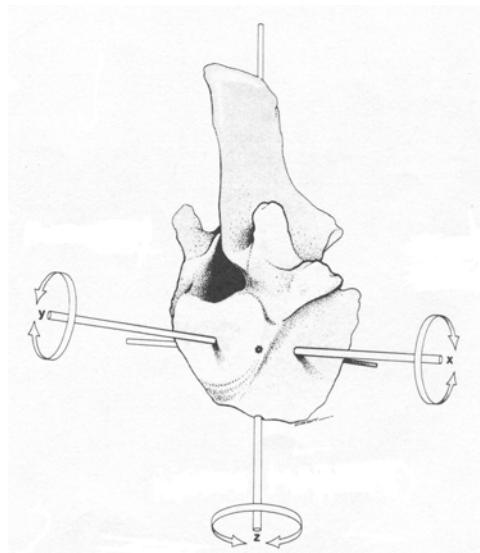


Figure n°35. Les mouvements vertébraux.

Face latérale gauche d'une 17^{ème} vertèbre thoracique, à laquelle est appliquée un repère orthogonal direct.

(D'après Townsend et coll. 1983)

flexion/extension = rotation autour de l'axe des x

latéro-flexion = rotation autour de l'axe des z

rotation axiale = rotation autour de l'axe des y

cisaillements transverses = translation le long de l'axe x

compressions longitudinales = translation le long de l'axe y

cisaillements verticaux = translation le long de l'axe z

Ainsi ces articulations de type sphérique comportent trois degrés de liberté et sont aussi le lieu de mouvements de translation dans les trois plans de l'espace.

Des études sur des pièces provenant d'êtres humains ont montré que les cisaillements et les compressions sont vraiment faibles dans cette espèce (Panjabi 1978 cité par Townsend et coll. 1983). De plus ces mouvements n'ayant été que très peu étudiés chez les EQUIDÉS nous les supposerons négligeables et ne les aborderons pas dans la suite de ce travail.

Ainsi nous considérerons que toutes les parties de la colonne vertébrale, sauf naturellement l'os sacrum, peuvent réaliser trois types de mouvements. Seuls diffèrent l'amplitude et le degré de spécialisation de ces derniers.

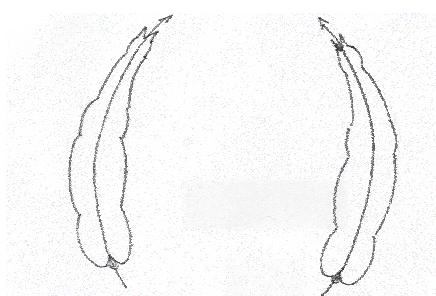
3131. FLEXION ET EXTENSION

La flexion correspond à une courbure dorsale ; les arcs vertébraux s'écartent, les corps se rapprochent, les disques vertébraux sont comprimés de leur côté ventral, les ligaments longitudinal dorsal, inter-lamellaires et inter-épineux se tendent tandis que le ligament longitudinal ventral se relâche.

L'extension correspond au contraire à une courbure ventrale, les arcs vertébraux se rapprochent, les corps s'écartent surtout par leur partie ventrale, les disques sont comprimés dorsalement, tous les ligaments dorsaux se relâchent tandis que le ligament longitudinal ventral se tend.

3132. LATERO-FLEXION

La latéro-flexion correspond à une courbure latérale ; on parle de latéro-flexion droite lorsque la concavité est à droite. Les processus articulaires s'emboîtent fortement du côté de la concavité et s'écartent du côté opposé.



Latéro flexion droite

Latéro flexion gauche

Figure n°36.

3133. ROTATION AXIALE

La rotation axiale correspond à un mouvement de torsion de la colonne vertébrale selon un axe horizontal ; on parle de rotation droite lorsque les processus épineux partent vers la droite de l'animal. Ce mouvement met à profit l'élasticité des disques intervertébraux qui augmente avec l'épaisseur de ces derniers. (Townsend et Leach 1984)

NB. Dans le texte, ces termes sont utilisés tour à tour pour décrire soit un mouvement d'ensemble d'une portion de la colonne vertébrale soit le mouvement d'une vertèbre par rapport à une autre (dans ce travail, nous décrirons les déplacements vertébraux par rapport à la vertèbre caudale adjacente). En effet, le mouvement d'ensemble d'une portion ne correspond pas forcément au même mouvement pour l'ensemble des vertèbres qui la composent. Par exemple dans de cas d'une flexion globale de la colonne sacro-thoraco-lombaire, le sacrum réalise un mouvement de flexion alors que les vertèbres thoraciques crâniales réalisent une extension.

32. ETUDES IN VITRO

321. ANATOMIE FONCTIONNELLE

Nous avons déjà vu que chaque complexe articulaire intervertébral, n'est le siège que de déplacements limités, c'est donc en s'ajoutant aux mouvements des segments voisins que ces déplacements arrivent à ployer de manière conséquente la colonne vertébrale considérée dans son ensemble.

Toutefois les divers complexes articulaires intervertébraux ne sont pas également mobiles.

La mobilité des différentes régions de la colonne vertébrale peut être reliée aux variations locales de la morphologie des composants ostéo-articulaires vertébraux. (Barone tome 2, Denoix 1999a, Haussler 1999a, Townsend et Leach 1984)

Les principaux facteurs intervenant sur la mobilité vertébrale sont :

- ⇒ La hauteur et la largeur des processus épineux
- ⇒ La conformation des processus articulaires
- ⇒ La conformation des processus transverses

- ⇒ La structure et l'élasticité des ligaments
- ⇒ L'épaisseur des disques intervertébraux.

3211. REGION CERVICALE

La région de l'encolure est caractérisée par une grande mobilité. L'amplitude des mouvements des articulations intervertébrales est nettement supérieure à celle de la colonne thoraco-lombaire. Cette différence fonctionnelle est principalement liée : (Denoix et Pailloux 2001a)

- ⇒ à la conformation des têtes et des fosses vertébrales et l'épaisseur relativement importante des disques intervertébraux
- ⇒ à la conformation et l'orientation des processus articulaires
- ⇒ au caractère rudimentaire des processus épineux
- ⇒ au ligament nuchal très élastique qui remplace les ligaments supra et inter épineux
- ⇒ à l'absence du ligament longitudinal ventral remplacé par le muscle long du cou.

Les articulations atlanto-occipitale et atlanto-axiale qui sont respectivement spécialisées dans des mouvements de flexion-extension et de rotation confèrent à la région cervicale supérieure (C0-C1 et C1-C2) la possibilité de déplacer la tête dans toutes les directions. (Barone tome 2, Denoix et Pailloux 2001a)

Les vertèbres cervicales constituent avec la tête le balancier cervico-céphalique. Chez les équidés, ce dernier joue un rôle important dans la locomotion notamment grâce à la participation du ligament nuchal et des puissants muscles insérés sur les tubercules des processus transverses et des crêtes ventrales de C3 à C5. (Barone tome 2)

32111. MOBILITE DE LA CHARNIERE CERVICO-THORACIQUE

La jonction cervico-thoracique (C6-T2) bénéficie de disques épais, de facettes articulaires larges d'orientation radiale, de plus le processus épineux de T1 est peu développé ; les mouvements de flexion et d'extension sont donc favorisés dans cette région (Townsend et Leach 1984). Il semble que cette articulation pourrait jouer un rôle important dans la locomotion en participant notamment aux mouvements cervico-céphaliques même si son importance n'a pas toujours été vraiment reconnue (Townsend et coll. 1983). De plus, le ligament nuchal pourrait

intervenir dans la dynamique de cette région, d'une part par sa morphologie et ses insertions et d'autre part par sa structure histologique riche en fibres élastiques capables lorsqu'elles sont étirées de stocker de l'énergie (Gellman et Bertram 2002a).

32112. ETUDE THEORIQUE DE LA MECANIQUE DES SEGMENTS CERVICO-CEPHALIQUE.

Le plus approprié des modèles mécaniques pour l'étude des segments de la tête et de l'encolure est celui de deux tiges articulées en rotation autour de la charnière cervico-céphalique. Ainsi, les forces ou les moments appliqués au niveau de cette charnière sont générés par la gravité, le ligament nuchal, la musculature cervicale et des forces inconnues produites par le reste du corps (Gellman et Bertram 2002b). Cf. figure n°37.

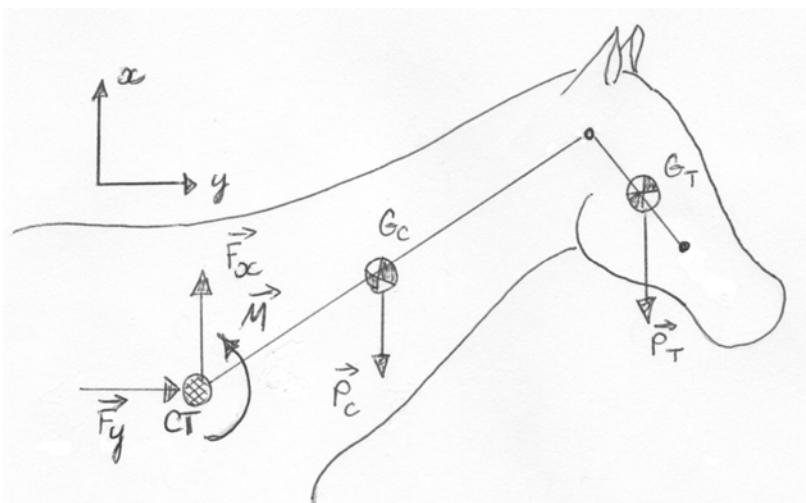


Figure n°37. Diagramme des corps libres des segments de l'encolure et de la tête, utilisant le modèle mécanique simplifié d'un système de tiges rigides articulées.

(Adapté d'après Gellman et Bertram 2002b)

CT = charnière cervico thoracique supposée être au niveau de l'articulation C7-T1.

G_C = centre de gravité du segment cervical et P_C son poids

G_T = centre de gravité du segment de la tête et P_T son poids

M = moment résultant des forces générées par la musculature cervicale et le ligament nuchal

F_x et F_y = forces inconnues agissant sur la charnière et provenant du reste du corps

3212. REGION THORACIQUE

La région thoracique crâniale est caractérisée par la longueur de ses processus épineux qui s'opposent aux mouvements de flexion et d'extension (Denoix 1986) et dont les plus hauts caractérisent la région du garrot ; ils jouent le rôle de puissants bras de levier pour le ligament nuchal et les muscles extenseurs de la colonne vertébrale.

La conformation des processus articulaires orientés tangentielle, les corps vertébraux petits avec des disques fins et les ligaments de plus en plus denses et fibreux dans le sens cranio caudale sont d'autres caractéristiques des vertèbres thoraciques qui vont dans le sens d'une moindre mobilité.

De la deuxième à la seizième vertèbres thoraciques, les facettes articulaires ont une orientation tangentielle et horizontale ce qui autorise les mouvements de rotation et de latéro-flexion. A partir de la seizième vertèbre thoracique elles deviennent plus verticales et engainantes ce qui restreint en partie les mouvements (Townsend et Leach 1984).

3213. REGION LOMBO-SACRALE

Cette région est caractérisée par une faible mobilité qui s'explique par :

- ⇒ De puissants ligaments fibreux, peu extensibles
- ⇒ Des processus articulaires très engainants
- ⇒ Des processus transverses longs et plats qui s'opposent à la latéro-flexion
- ⇒ La présence d'articulations inter-transversaires au niveau des dernières vertèbres lombaires et de l'articulation lombo-sacrée.

Cette rigidité lui confère une grande solidité qui lui permet de recevoir et de transmettre les forces de propulsion des membres postérieurs, selon certains auteurs, sans cette condition le cheval serait incapable de réaliser une locomotion orientée vers des performances de vitesses. (Barone tome 2, Jeffcott et Dalin 1980a)

Parallèlement, l'articulation lombo-sacrée se caractérise par un épaississement du disque intervertébral, l'absence du ligament supra-épineux et la laxité du ligament inter-épineux (Denoix 1986, Jeffcott et Dalin 1980a) et par un rétrécissement des processus épineux accompagné d'une divergence de leur orientation de façon à produire un large espace inter-épineux entre L6 et S1 (Stecher 1962, Townsend et Leach 1984, Denoix 1992a). Ainsi, les possibilités de

mouvement notamment en flexion et en extension sont largement augmentées pour cette articulation. (Cf. figure n°38)

Chez certains individus on observe des variations dans l'orientation du processus épineux de L6 qui peut être orienté verticalement ou dorso-caudalement. Ainsi l'espace inter épineux entre L6 et S1 se trouve réduit voir absent.

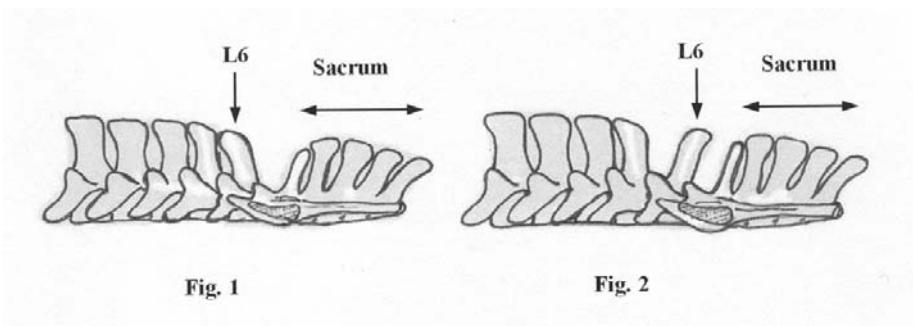


Figure n°38. Schéma de la jonction lombo-sacrée, illustrant la divergence des processus épineux.

(D'après Haussler et coll. 1997)

Fig.1 : le processus épineux de L6 est orienté crâneo-dorsalement, l'espace inter-épineux L6-S1 est maximum.

Fig.2 : le processus épineux de L6 est orienté dorso-caudalement, l'espace inter-épineux L6-S1 est réduit.

Selon certains auteurs, ce phénomène pourrait principalement affecter les insertions musculaires et ligamentaires à ce niveau et entraîner secondairement des modifications de la biomécanique vertébrale et pelvienne potentiellement à l'origine de mauvaises performances voir d'un certain degré d'invalidité. (Denoux 1992b, Haussler et coll. 1997)

La mobilité particulière de l'articulation lombo sacrale et la rigidité des régions qui lui sont adjacentes pourraient jouer un rôle important dans la locomotion comme on pu l'imaginer de nombreux auteurs au cour du 20^{ème} siècle. Jeffcott et Dalin en 1980a citent à ce sujet, le concept biomécanique de Slijper (1946) repris par Badoux (1975), selon lequel les os du dos sont construits d'après le schéma de l'arc et de la corde ; où l'arc qui comprend la colonne vertébrale, ses ligaments et sa musculature épiaxiale est gardé sous tension par une corde formée par le sternum, les muscles abdominaux et les muscles des jambes.

3214. REGION PELVIENNE ET ARTICULATIONS SACRO-ILIAQUES

Le bassin est composé par l'union des deux os coxaux et du sacrum, il est articulé d'une part avec le membre pelvien au niveau de l'acétabulum et d'autre part à la colonne vertébrale à laquelle il est solidement lié par le biais des articulations sacro-iliaques.

Les articulations sacro-iliaques constituent donc le centre de transmission des efforts propulsifs provenant des membres pelviens. Ainsi leur mobilité est réduite, accordant simplement une certaine souplesse à l'union très solide des os coxaux aux vertèbres. (Barone tome 2, p. 239)

32141. MOBILITE DE LA REGION PELVIENNE I.E. DES ARTICULATIONS SACRO-ILIAQUES

En théorie, il peut se produire :

- ⇒ De faibles mouvements de glissement dans les trois dimensions de l'espace (ou **cisaillement**)
- ⇒ Des mouvements de bascule autour d'un axe transversal passant par les surfaces auriculaires du sacrum provoquant soit un élargissement de la filière pelvienne par éloignement du plancher pelvien et de la région sacro-coccigienne (**nutation**) ou au contraire un rétrécissement par rapprochement (**contre nutation**). (Barone tome 2, Degueurce et coll. 2005) Les ligaments sacro-iliaque dorsal et sacro-sciatique ainsi que le muscle petit psoas pourraient contribuer en partie à limiter ce type de mouvement. (Cf. figure n°39 et 42)
- ⇒ Des mouvements de bascule autour d'un axe transversal, le sacrum et l'os coxal restant immobiles l'un par rapport à l'autre ; on parlera alors de **flexion** ou d'**extension** du bassin.

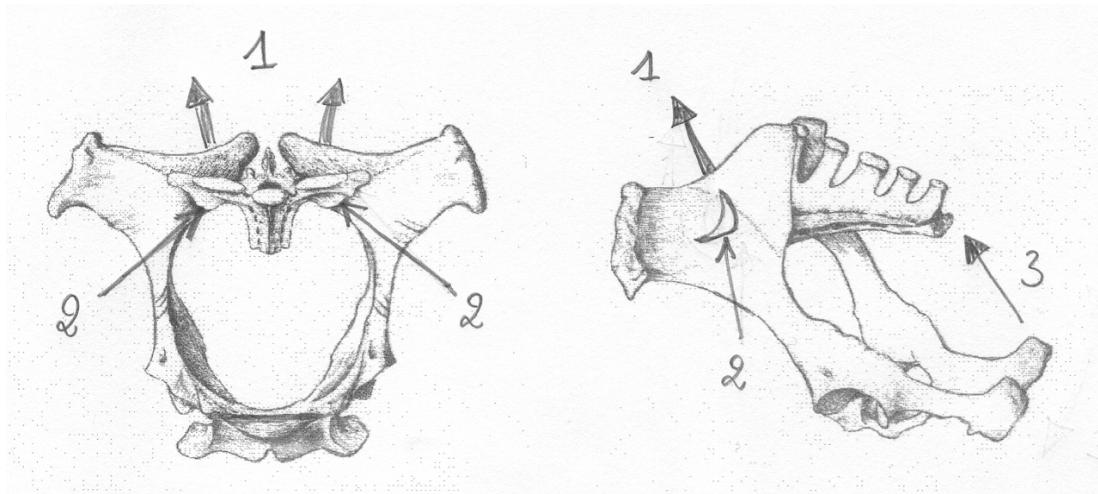


Figure n°39. Mouvement de nutation

(adapté d'après Barone, Denoix 1992a)

1 : traction des ailes de l'ilium provoquant un écartement des tuber sacrales et une « ouverture » ou écartement dorsale de l'articulation sacro iliaque.

2 : compression ventrale de l'articulation sacro iliaque

3 : écartement de la filière pelvienne.

32142. ETUDES THEORIQUES DE LA MECANIQUE DE LA REGION PELVIENNE

ETUDE STATIQUE

Plan transversal

Dans le cas d'un appui bipodal, les principales forces mise en jeu sont le poids du corps et la réaction des membres en appui sur le sol. Ces forces entraînent une force de traction au niveau de la face dorsale de l'articulation sacro-iliaque provoquant une tendance à l'écartement des surfaces articulaires, c'est à dire à la luxation.

Dans le cas d'un appui monopodal, la force de réaction du membre à l'appui est plus importante. Des forces de traction en face dorsale tendant à l'écartement des surfaces articulaires et éventuellement un pincement en face ventrale. (Denoix 1992a) (Cf. figure n°40)

Par ailleurs, d'après Jeffcott et coll. 1985, elles seraient davantage soumises à des forces déchirantes que compressives.

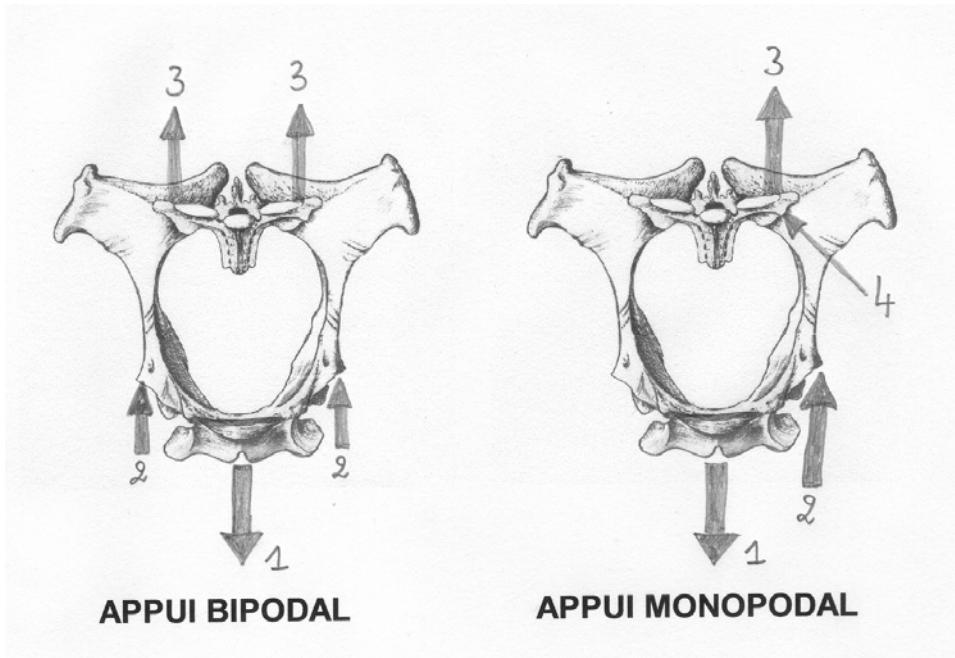


Figure n°40. Vues crâniales du bassin illustrant les principales forces exercées sur les articulations sacro-iliaques

(D'après Denoix 1992a)

1 : poids du corps,

2 : réaction du membre postérieur en appui sur le sol

3 : traction exercée sur la face dorsale de l'articulation sacro iliaque avec tendance à l'écartement des surfaces articulaires

4 : éventuel pincement de la face ventrale de l'articulation.

Plan horizontal

Les contraintes seraient plus importantes au trot qu'au galop. (Rooney 1977)

(Cf. figure n°41)

En théorie, au trot les déplacements en sens inverse des membres postérieurs pourraient soumettre le bassin à des mouvements de rotation dans le plan horizontal et dans le plan transversal ce qui entraînerait une torsion de l'aile de l'ilium au niveau de l'articulation sacro-iliaque.

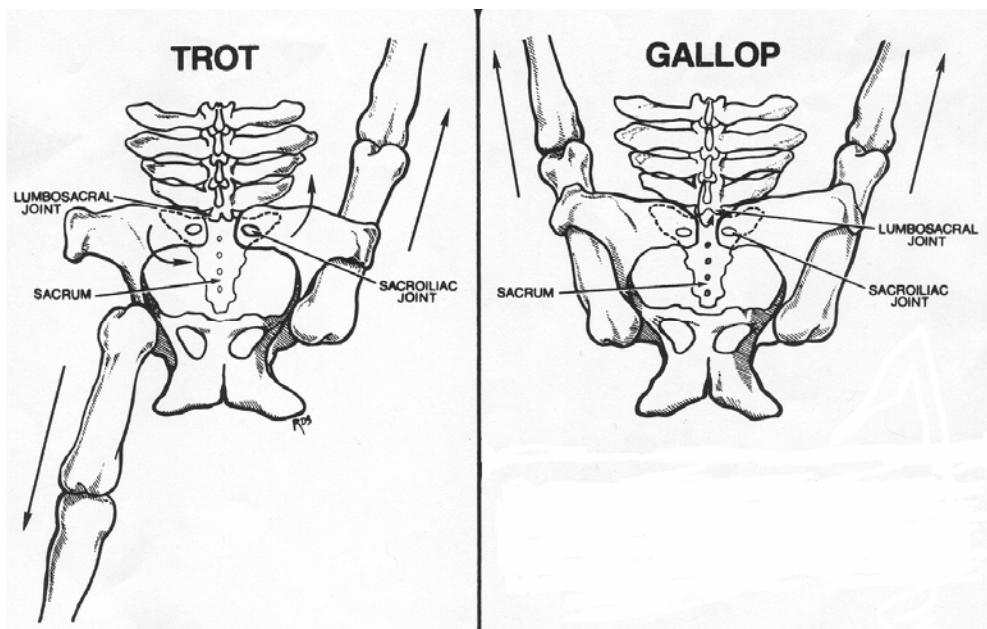


Figure n° 41. Vues dorsales de bassin au trot et au galop illustrant les différences de contraintes théoriquement imposées aux articulations sacro-iliaques.

(Rooney 1977)

Plan sagittal

Les forces provenant des membres postérieurs à l'appui induisent une rotation passive de chaque os coxal par rapport au sacrum considéré comme fixe, provoquant un rapprochement des ischium et des premières vertèbres caudales.

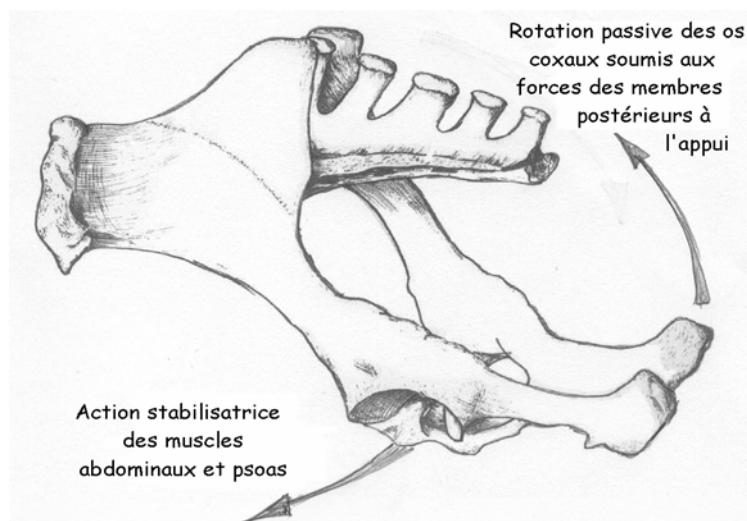


Figure 42. Action stabilisatrice des muscles de l'abdomen.

Cette traction est stabilisée par l'action des muscles de la paroi ventrale de l'abdomen et le muscle ilio-psoas. (Denoix 1992a, b)

ETUDE DYNAMIQUE

La complexité de l'étude d'un système en mouvement, rend l'approche théorique difficile car elle est nécessairement entachée d'approximations importantes (frottements impossibles à quantifier, accélération inconstante)

Ces études soulignent principalement que le trot et l'amble sollicitent davantage les articulations sacro-iliaques que le galop et que quand un cheval négocie une courbe, il doit créer une force centripète qui soumet les articulations sacro-iliaques à des contraintes supplémentaires.

En effet, des études cinématographiques portant sur des trotteurs attelés et filmés sur une piste plane ont montré que dans les virages le cheval se penche à l'intérieur de la courbe et projette ses postérieurs à l'extérieur. Ainsi, pour que les appuis soient corrects, il faudrait donc que le plan médian de l'animal soit perpendiculaire à la surface de la piste, selon le même principe que les vélodromes. (Denoix 1992a)

322. EXPERIENCES SUR PIECES DE DISSECTION

3221. REGION CERVICALE

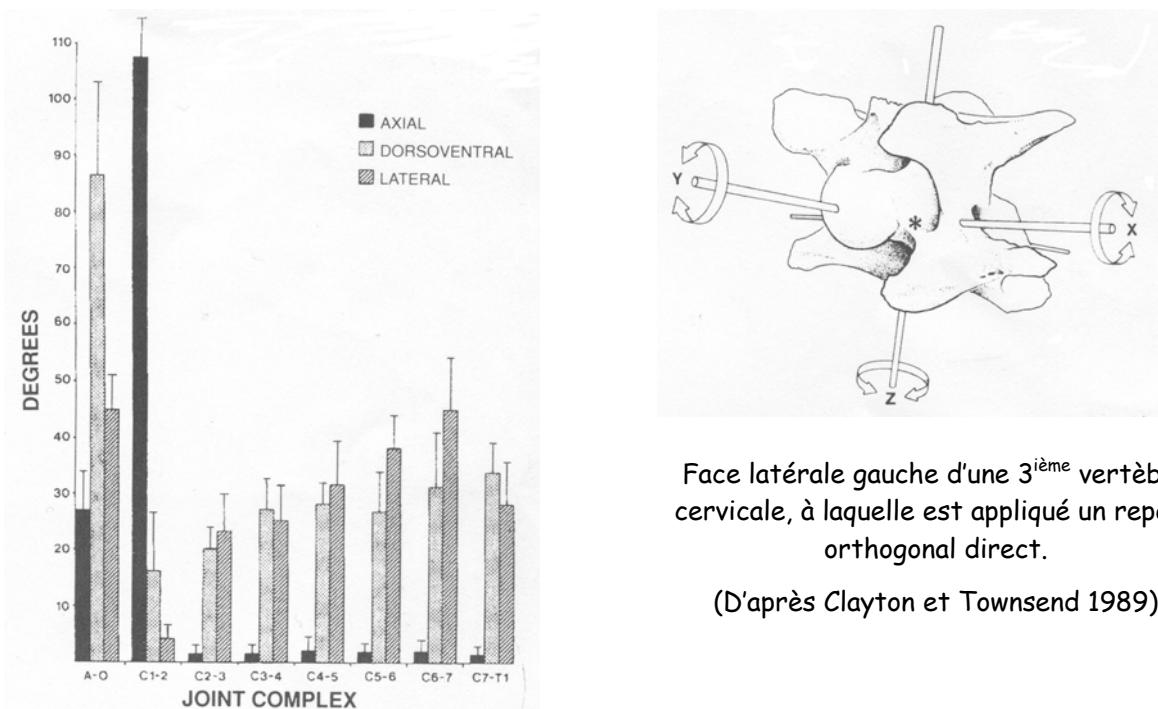
Dans la littérature, il existe peu d'études sur la région cervicale en comparaison avec la région thoraco-lombaire. Ainsi, seulement deux expériences vont retenir notre attention.

✓ La première fut réalisée par **Clayton et Townsend en 1989**, avec comme objectif de mesurer les mouvements des articulations intervertébrales de l'occiput à la première vertèbre thoracique. Pour cela, ils ont repris un protocole similaire à celui qu'ils ont utilisé pour la région thoraco-lombaire (Townsend et coll. 1983).

[Cf. 2^{ième} partie, § 3222]

Ils ont travaillé sur 14 pièces comprenant la tête, les vertèbres cervicales et les cinq premières thoraciques, disséquées en prenant soin de conserver en état les ligaments et les capsules articulaires. Pour respecter la répartition des masses du segment, les côtes furent rompues à leur base et la tête coupée transversalement au niveau de l'articulation temporo-mandibulaire.

Les préparations sont soumises à des contraintes manuelles au niveau de la tête sur la région de l'occiput alors que la partie caudale du segment est fixé dans un étau ; les déplacements de chaque complexe articulaire sont estimés en mesurant sur des photographies les changements angulaires d'aiguilles implantées dans les corps vertébraux. La flexion et l'extension, la rotation axiale et la latéro-flexion sont testées indépendamment et les données obtenues sont traitées à l'aide de méthodes statistiques.



Face latérale gauche d'une 3^{ième} vertèbre cervicale, à laquelle est appliqué un repère orthogonal direct.

(D'après Clayton et Townsend 1989)

Figure n° 43. Amplitude de rotation obtenue à chaque articulation intervertébrale dans les trois dimensions de l'espace.

(D'après Clayton et Townsend 1989)

flexion/extension = rotation autour de l'axe des x
latéro-flexion = rotation autour de l'axe des z
rotation axiale = rotation autour de l'axe des y
A-O = atlanto-axiale.

Les résultats de cette étude montrent que toutes les vertèbres cervicales peuvent bouger dans les trois dimensions de l'espace. Cependant, certaines articulations présentent des différences significatives d'amplitudes pour un type de mouvement. (Cf. figure n°43)

Par ailleurs, pour les articulations entre C3 et T1, les mouvements de rotation axiale et de latéro-flexion apparaissent être couplés, de telle sorte qu'une latéro-flexion de la colonne cervicale d'un côté est accompagnée d'une rotation axiale qui amènent les processus épineux vers la convexité.

Les différences d'amplitude relevées entre les articulations s'expliquent en grande partie avec l'anatomie.

Pour l'articulation atlanto-occipitale les résultats sont en accord avec sa morphologie puisqu'ils montrent qu'elle est principalement le lieu des mouvements de flexion et d'extension (32% de l'amplitude totale de la colonne cervicale). Les résultats concernant la latéro-flexion indiquent qu'elle peut être relativement importante quand la tête est en extension. En effet, elle est anatomiquement limitée par le pincement entre les processus jugulaires et les ailes de l'atlas qui est plus important si la tête est fléchie. Les résultats concernant la rotation axiale sont toutefois surprenants aux vues de l'anatomie de l'articulation. Les manipulations montrent qu'elle n'est possible seulement en conjugaison avec un glissement crânio-caudal.

Pour l'articulation atlanto-axiale, les résultats confirment que cette trochoïde est le lieu principal des mouvements de rotation axiale de l'encolure (73% de l'amplitude de rotation totale) et qu'elle est limitée pour les mouvements latéraux et dorso-ventraux.

Enfin, caudalement à l'axis les articulations sont similaires en terme de morphologie et d'amplitude de mouvement. Cependant, il existe des différences significatives entre ces articulations concernant l'amplitude en flexion et en extension qui peuvent s'expliquer par l'orientation des surfaces synoviales des processus articulaires.

✓ Une autre étude expérimentale sur la région cervicale fut réalisée par **Gellman et Bertram en 2002**, avec comme objectif d'investir les propriétés structurelles et comportementales du ligament nuchal, afin de mieux comprendre son rôle dans la locomotion. Pour cela, ils sont parti du principe que les déformations en longueur imposées au ligament nuchal peuvent être reliées à une force par unité de volume au travers de la relation existant entre la force et la déformation du tissu élastique. (Cf. figure n°44)

Ils ont utilisé un protocole comprenant cinq cadavres très fraîchement disséqués sur lesquels ils ont mesurés les changements de longueur du ligament nuchal imposés par la position du segment tête-encolure.

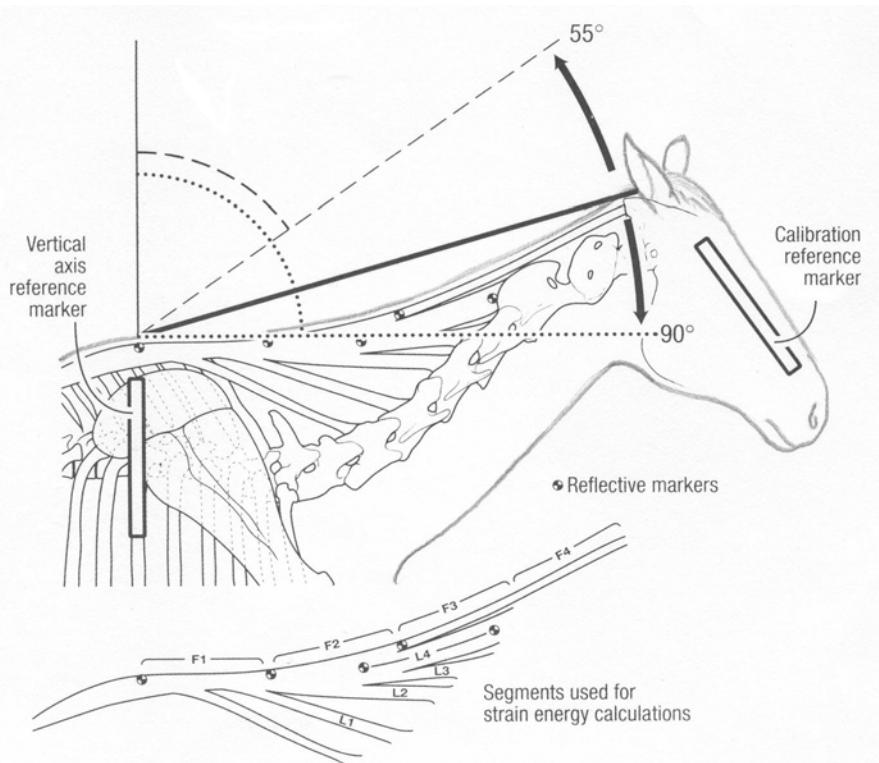


Figure n°44. Mesure sur cadavre de l'énergie de tension élastique présente dans le ligament nuchal.

(D'après Gellman et Bertram 2002a)

L'angle de l'encolure est mesuré à partir du sommet de la tête, du garrot et de la projection verticale d'un marqueur de référence perpendiculaire au sol.

La tête est déplacée manuellement d'une position « d'alerte » de 50° à une position horizontale de 95° de telle sorte que les amplitudes atteintes généralement durant la locomotion (55°-90°) soient incluses dans ces limites. Le marqueur de référence sur la tête est utilisé pour calibrer la distance pour les mesures de tension.

Le diagramme en bas montrent les divisions fonctionnelles du ligament nuchal qui ont été considérées (F=funiculaire, L=lamellaire).

Le volume de chaque segment fut déterminé par immersion dans un récipient gradué et mesure du déplacement du niveau d'eau.

Les résultats de cette étude montrent que la position neutre, c'est-à-dire imposée par la rétraction du ligament nuchal tend à être autour de 55°. Ainsi dans cette position toutes les parties du ligament sont non tendues.

Les portions caudales de la partie funiculaire et la portion crâniale de la partie lamellaire (F1, F2 et L4) sont les plus volumineuses et aussi les plus déformables. Ainsi le stockage potentiel d'énergie élastique produite par les tensions et les stress imposés aux fibres élastiques serait maximum à ce niveau. Ceci pouvant être en rapport avec l'anatomie des insertions relativement importantes du ligament nuchal au niveau du garrot et de la deuxième vertèbre cervicale.

Ainsi, durant la locomotion les mouvements de la tête pourraient permettre à l'animal de réduire la puissance de son travail musculaire par l'utilisation de l'énergie stockée dans le ligament nuchal (Gellman et Bertram 2002b).

Parallèlement, les segments lamellaires compris entre C3 et C6 ont aussi un volume important mais furent peu déformés dans les conditions de cette étude. Ainsi, ils ne contribueraient pas à la locomotion mais ils pourraient cependant jouer un rôle important dans l'abaissement de la tête jusqu'au sol, mouvement important chez les herbivores.

3222. REGION THORACO LOMBAIRE

✓ Jeffcott et Dalin en 1980a ont mené une étude visant à évaluer la flexibilité globale des régions thoraciques caudale et lombaire (de T10 à L2).

Leur protocole comprenait 5 pièces de dissection sur lesquelles les membres, les vertèbres cervicales, la cage thoracique et les muscles épiaxiaux furent retirés.

Ils ont assimilé l'amplitude du mouvement des articulations intervertébrales aux différences de distance mesurées entre deux processus épineux adjacents en position de référence et en position forcée.

L'extension fut reproduite en posant la pièce en appui sur ses extrémités crâniale et caudale, un poids suspendu en son milieu (T12-T13) ; 10 kg furent suffisants pour obtenir une amplitude maximum.

La flexion maximale fut obtenue simplement en posant la pièce en équilibre sous le corps de T13.

La latéro-flexion fut réalisée en appliquant une pression manuelle au niveau de T1, alors que le sacrum était fixé par son extrémité caudale.

La rotation axiale fut de même testée par des torsions manuelles.

(Cf. figure n°45)

Les résultats de cette expérience ont montré que la flexibilité en flexion/extension de la colonne vertébrale diminue dans le sens crâneo-caudale entre T10 et L1. De plus, aucun mouvement appréciable de latéro-flexion et de rotation axiale n'a été observé caudalement à T13 en utilisant ce protocole.

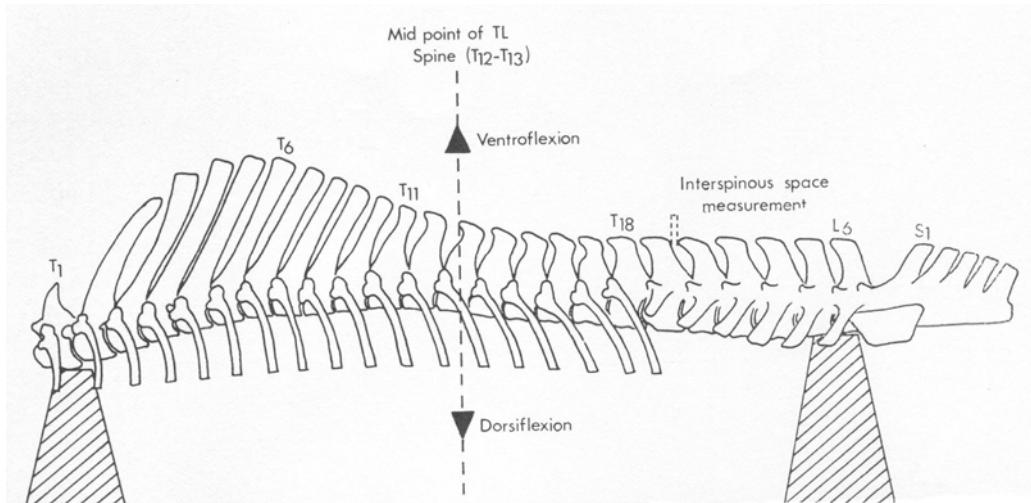


Figure n°45. Protocole expérimental utilisé par Jeffcott et Dalin (1980a)

Cette méthode permet la mesure de l'amplitude des mouvements dorso-ventraux de la colonne vertébrale.

Chaque spécimen fut fixé au niveau de T1 et de L6, les pressions sont appliquées au milieu du dos (soit au niveau de T12-T13).

Pour Jeffcott et Dalin cette expérience confirme la relative inflexibilité de la colonne vertébrale thoraco-lombaire, cette dernière permettant d'obtenir la solidité nécessaire au type de locomotion des Equidés.

Cependant cette expérience comporte deux biais importants (Townsend et coll. 1983, Denoix 1999a), d'une part les contraintes imposées pour reproduire la flexion et l'extension sont très loin des conditions physiologiques et d'autre part les résultats ne tiennent pas compte des variations de distance entre les points de mesures et les centres instantanés de rotation de chaque complexe articulaire, ceci ayant pour effet d'augmenter l'amplitude de lecture là où les processus épineux sont hauts et de la diminuer là où ils sont bas.

✓ Townsend et coll. en 1983 ont réalisé une étude visant à mesurer les mouvements des articulations intervertébrales.

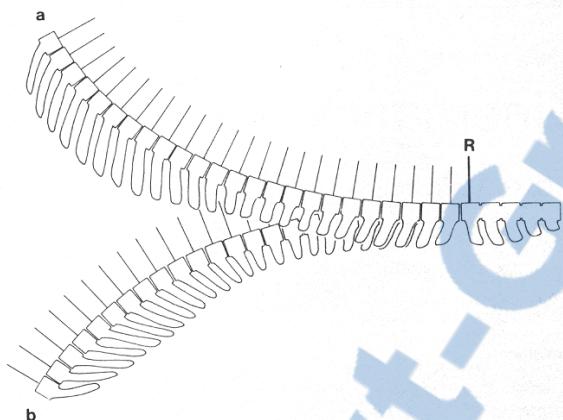
Ainsi ils ont évalué d'une part le type et l'amplitude des mouvements pouvant se produire dans chacun des complexes articulaires de la colonne thoraco-lombaire et d'autre part l'effet de la cage thoracique sur la mobilité de la colonne vertébrale.

Leur protocole comprenait 18 pièces de dissection thoraco lombo sacrales provenant de chevaux qui ne présentaient aucun antécédent de lésions ou de douleurs dorsales, sur lesquelles les ligaments associés, les capsules articulaires et les disques intervertébraux ont été le plus possible conservés en état.

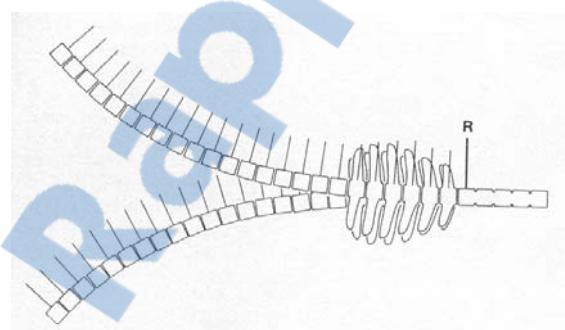
Les côtes et le sternum sont dans un premier temps laissés intacts sur 8 pièces afin d'évaluer la mobilité vertébrale avec et sans la cage thoracique.

Les préparations sont soumises à des contraintes manuelles au niveau de T1 alors que le sacrum est fixé dans un étau ; les déplacements de chaque complexe articulaire sont estimés en mesurant sur des photographies les changements angulaires d'aiguilles implantées dans les corps vertébraux lorsque la cage thoracique est retirée et dans les processus épineux lorsqu' elle est encore intacte.

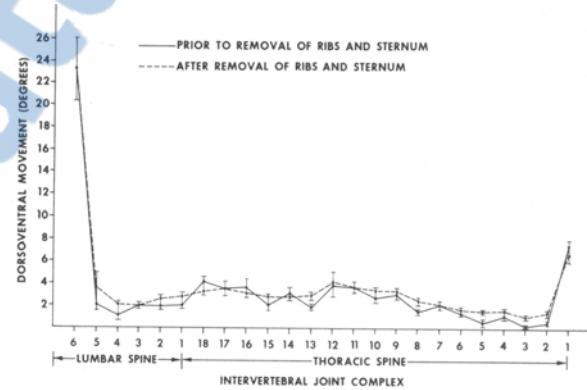
La flexion-extension, la rotation axiale et la latéro-flexion sont testées indépendamment et les données obtenues sont traitées à l'aide de méthodes statistiques.



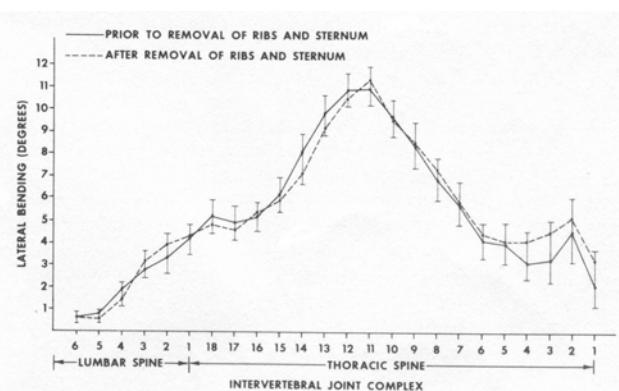
a/ Représentation schématique de la méthode expérimentale de mesure des mouvements de flexion et d'extension utilisée par Townsend et coll. 1983



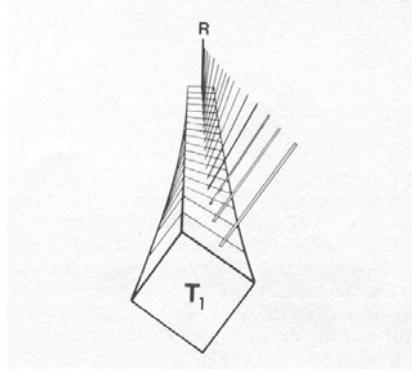
b/ Représentation schématique de la méthode expérimentale de mesure des mouvements de latéro-flexion utilisée par Townsend et coll. 1983



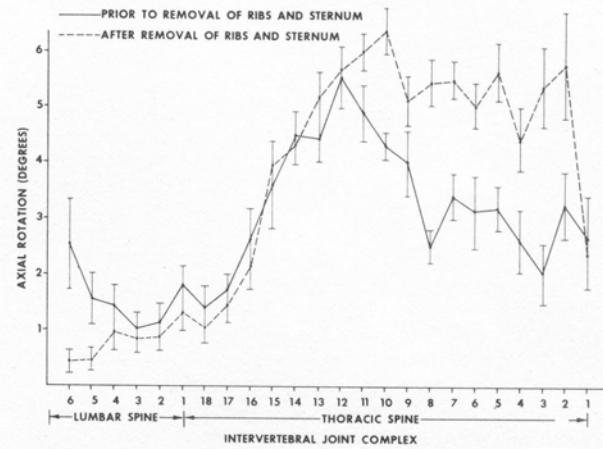
Graphique comparant les amplitudes de flexion et d'extension mesurées au niveau des espaces intervertébraux avant et après le retrait de la cage thoracique.



Graphique comparant les amplitudes de latéro-flexion mesurées au niveau des espaces intervertébraux avant et après le retrait de la cage thoracique.



c/ Représentation schématique de la méthode expérimentale de mesure des mouvements de rotation axiale utilisée par Townsend et coll. 1983



Graphique comparant les amplitudes de rotation mesurées au niveau des espaces intervertébraux avant et après le retrait de la cage thoracique.

Figures 46. Protocole et résultats expérimentaux de Townsend et coll. 1983.

Les résultats de cette étude ont confirmé que trois types de mouvements pouvaient se produire dans chacune des articulations de la colonne thoraco-lombaire dans la mesure où ces dernières ne sont pas fusionnées.

Des différences significatives dans l'amplitude de ces mouvements ont été mesurées entre les complexes articulaires.

La flexion/extension est nettement supérieure au niveau des articulations lombo-sacrée et de la première vertèbre thoracique, elle reste relativement faible entre T2 et L6.

La rotation et la latéro-flexion sont observées tout au long de la colonne thoraco-lombaire, le maximum de mobilité se produit au milieu du dos ; entre T9 et T14 pour la rotation axiale et autour de la région centrée sur T11-T12 pour la latéro-flexion.

Bien que le protocole utilisé dans cette étude permet de mesurer des mouvements dans un seul plan à la fois, les opérateurs ont pu observer, notamment autour de T11-T12, que la latéro-flexion d'un côté était systématiquement couplée à une rotation axiale qui amène les processus épineux dans le sens opposé.

Le retrait de la cage thoracique crée une augmentation significative de l'amplitude de rotation au niveau de la région thoracique crâniale, suggérant un rôle stabilisateur des côtes sternales. Au contraire on observe une diminution de

la rotation dans la région lombaire caudale, pour l'auteur ce phénomène n'est pas cohérent et ne trouve pas pour l'instant d'explication. Enfin, le retrait de la cage thoracique n'a pas d'effet significatif sur les mouvements de flexion/extension et de latéro-flexion.

	Flexion-extension	Latéro-flexion	Rotation axiale
T1-T2	++	+	+
T2-T16	+	+++	+++
T16-L6	+	+	+
L6-S1	++++	+	+

Tableau n°3. Amplitude des mouvements

(Townsend et coll. 1983, Townsend et Leach 1984)

La détermination des quatre régions fonctionnelles de la colonne thoraco-lombaire repose en partie sur la morphologie des articulations intervertébrales.

Le protocole de cette étude permet d'obtenir des résultats précis et originaux notamment sur les mouvements de rotation axiale et de latéro-flexion. Cependant les forces de contraintes appliquées en un point et perpendiculairement à l'axe vertébral sont très différentes des conditions physiologiques (Denoix 1999a) et l'on peut se demander dans quelle mesure une force appliquée au niveau de T1 est distribuée le long de la colonne aux autres articulations (Townsend et coll. 1983).

3223. REGIONS CERVICALE ET THORACO-LOMBAIRE

Denoix (1986, 1987) a réalisé une étude visant à mesurer l'amplitude des mouvements de flexion extension de la colonne thoraco lombaire et à évaluer l'effet de la position de l'encolure sur sa mobilité.

Son protocole comportait 5 pièces de dissection composées de la tête, la colonne vertébrale, des côtes, du sternum, du bassin ainsi que tous les ligaments associés avec notamment les ligaments nuchal et supra-épineux conservés le plus possible en état.

La flexion thoraco-lombaire est réalisée au moyen d'élastiques tendus entre le sternum et le pubis de façon à reproduire l'action des muscles de la paroi de l'abdomen. L'extension est de même réalisée en tendant des élastiques entre les tuber sacrales et les processus épineux des 3 premières vertèbres thoraciques de manière à reproduire l'action de la masse commune de l'*erector spinae*.

Les mouvements vertébraux sont évalués par deux méthodes différentes. La première consiste à mesurer sur des photographies les déplacements angulaires d'aiguilles implantées dans les processus épineux de T5, T9, T14, T18, L5 et S1. La deuxième permet de mesurer sur des radiographies le centre instantané de rotation des vertèbres ainsi que l'amplitude des mouvements intervertébraux à l'aide de petits clous radio-opaques implantés dans les corps vertébraux et les processus épineux et articulaires de chaque vertèbre comprise entre T1 et S1.

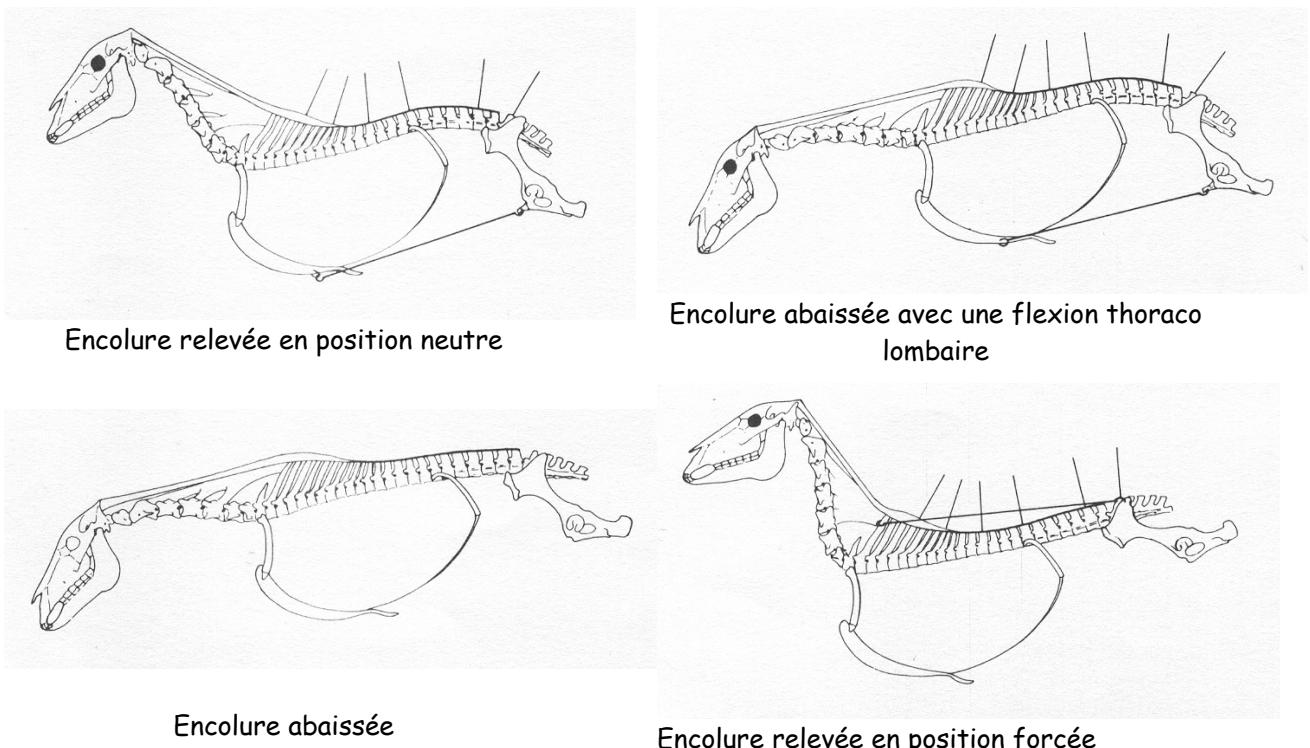


Figure 47. Protocole expérimental utilisé par Denoix en 1986

Les mouvements sont estimés sous différentes conditions :

(Cf. figure n°47)

- ⇒ l'encolure est relevée en position neutre (i.e. le ligament nuchal est détendu) avec une flexion thoraco-lombaire,
- ⇒ l'encolure est abaissée (i. e. en flexion, le ligament nuchal est tendu) avec la région thoraco-lombaire en position neutre,
- ⇒ l'encolure est abaissée avec une flexion thoraco-lombaire (réalisé grâce à un élastique),
- ⇒ l'encolure est relevée en position forcée (i.e. en extension) avec une extension thoraco-lombaire (réalisé grâce à un élastique).

Les résultats obtenus montrent nettement que la zone la plus flexible de la colonne thoraco-lombaire est l'articulation lombo-sacrée. Dans une moindre mesure, des déplacements dorso-ventraux sont présents autour de la jonction thoraco-lombaire pendant la flexion et l'extension forcée. Les zones les plus rigides sont localisées aux extrémités, entre T3 et T9 et L2 et L5.

L'abaissement de l'encolure provoque une flexion de la colonne thoracique, plus prononcée entre T6 et T10. Ce phénomène est du à la traction du ligament nuchal qui attire les processus épineux vers l'avant, les déplacements plus importants entre T6 et T10 pourraient être le résultats de deux particularités anatomiques : d'une part une élasticité encore notable du ligament supra-épineux et d'autre part une diminution de la hauteur des processus épineux.

L'abaissement de l'encolure couplé avec une flexion thoraco-lombaire, montre une diminution des possibilités de flexion de la colonne lombaire, cette rigidification étant liée à la mise sous tension du ligament supra épineux par la traction du ligament nuchal et à sa faible élasticité dans cette région. Dans les autres régions on observe que plus la force de flexion augmente, plus la part de déplacements provoquée par la descente de l'encolure diminue surtout caudalement à T9. Enfin les possibilités de flexion lombo-sacrée semblent être augmentées quand l'encolure est descendue.

3224. REGION PELVIENNE

Une étude portant sur trois bassins disséqués qui ont été soumis à des forces de compression à l'aide d'une presse hydraulique, a montré que dans son ensemble le bassin est déformable. (Denoix 1992a)

Il présente une grande résistance dans l'axe longitudinal qui correspond à l'axe d'impulsion du cheval. Il est plus fragile dans l'axe dorso-ventral et l'axe transversal. La partie funiculaire du ligament sacro-iliaque dorsal semble particulièrement solide.

✓ **Degueurce et coll. 2005** ont réalisé récemment une étude *in vitro* visant à mesurer l'amplitude des mouvements de nutation et de contre nutation des articulations sacro-iliaques et à évaluer les conséquences de la desmotomie des ligaments sacro-tubéraux et sacro-sciatiques sur la mobilité de ces articulations. Leur protocole comprenait 6 pièces de dissection provenant de chevaux euthanasiés pour des raisons autres que des problèmes locomoteurs. Les os coxaux, le sacrum et la partie caudale de la colonne lombaire (L3 incluse) furent

conservés avec l'intégralité des ligaments associés à cette zone en prenant soin qu'aucun des ces derniers ne soit lésé.

Chaque bassin fut fortement fixé à une lourde plateforme grâce à des vis placées au travers des os pubis et ischium. Puis, des jeux de trois marqueurs ultrasonores furent placés au niveau du processus épineux de la 5^{ème} vertèbre lombaire, de la crête médiane du sacrum et de l'aile gauche de l'ilium afin d'évaluer les mouvements à l'aide d'une méthode utilisant un système d'analyse cinématique tridimensionnelle fondé sur le principe de la triangulation ultrasonore. La colonne lombaire fut utilisée comme bras de levier pour permettre la mobilisation des articulations sacro-iliaques, grâce à une tige métallique placée dans le canal vertébral de la 3^{ème} vertèbre lombaire et reliée à une presse électrique. La charge la plus forte imposée a été choisie de façon approximative comme étant la contrainte maximale pouvant être supportée par une articulation lombo-sacrée de « morphologie moyenne ».

Chaque pièce a d'abord subit 5 cycles de flexion-extension. Puis, après avoir sectionné les ligaments sacro-tubéraux et sacro-sciatiques, 5 nouveaux cycles ont été réalisés et comparés aux premiers.

Les résultats de cette étude montrent que les articulations sacro-iliaques sont animées de mouvements de très faible amplitude dans le plan sagittal ($< 1^\circ$). Elles subissent une nutation pendant la flexion de l'articulation lombo-sacrée et une contre nutation quand cette dernière retourne vers une position neutre. Aucun mouvement n'a été observé lors de l'extension lombo-sacrée.

En parallèle la desmotomie des ligaments sacro-tubéraux et sacro-sciatiques a augmenté de façon significative la mobilité des articulations sacro-iliaques sur l'ensemble des pièces testées sans pour autant modifier celle de l'articulation lombo-sacrée.

Le protocole et le système d'analyse de cette étude permettent d'obtenir des résultats relativement fiables. Cependant, ces derniers doivent être interprétés avec précaution car d'une part ils ne sont que le reflet partiel des capacités de mobilisations des articulations *in vivo* et d'autre part ils ne rendent compte que des mouvements dans le plan sagittal.

L'amplitude très faible des mouvements mesurés confirme que ces articulations sont très peu mobiles et que leur fonction est basée sur la stabilité. Cette stabilité est en partie assurée par les formations ligamentaires, comme le montrent les résultats obtenus après la desmotomie des ligaments sacro-tubéraux et sacro-sciatiques.

D'après les auteurs, l'application de ces résultats dans le vivant impliquerait que les articulations sacro-iliaques subissent des contraintes plus importantes lors des fortes flexions lombo-sacrées ce qui est le cas notamment lorsque les deux membres postérieurs sont en protraction simultanément comme lors du galop et du saut.

Cette hypothèse vient contredire la théorie selon laquelle le trot solliciterait d'avantage les articulations sacro-iliaques que le galop (Rooney 1977)

Enfin, la mesure d'amplitudes aussi faibles a une importante conséquence pratique ; en effet il est possible que ces mouvements ne soient pas visibles sur le vivant avec les méthodes d'investigation actuelles (Degueurce et coll. 2005).

L'ensemble des résultats de ces investigations *in vitro* ne sont que le reflet partiel des mouvements *in vivo* et ne peuvent pas être appliqués sans réserve aux êtres vivants notamment car ils ne prennent pas en compte les effets potentiels des tissus mous et de l'action musculaire.

De plus, les conséquences des changements post mortem et de l'isolement de la colonne vertébrale sur les caractéristiques de mobilité ne sont pas connues (Townsend et coll. 1983).

Enfin, la manière dont furent appliquées les forces sur la colonne vertébrale est critiquable et peut avoir compté dans les différences de résultats obtenus dans ces études (Townsend et coll. 1983, Faber et coll. 2001a).

Elles ont néanmoins permis de réaliser des prédictions utiles pour la réalisation des études *in vivo*.

33. ETUDES IN VIVO

L'étude *in vivo* de la mobilité de la colonne vertébrale est plus difficile que celle *in vitro* car d'une part les mouvements qui l'animent sont complexes et de faibles amplitudes et d'autre part la masse des muscles épiaxiaux empêche l'observation directe des vertèbres et les rend relativement peu accessibles. Ainsi, ce type d'étude nécessite des techniques extrêmement sensibles et précises dont la mise en place peut s'avérer fastidieuse et onéreuse.

331. CINÉMATIQUE

L'étude *in vivo* de la cinématique de la colonne vertébrale constitue la base de l'analyse fonctionnelle du mouvement vertébral. (Faber et coll. 2002) En effet, comme pour les membres elle vise à évaluer les mouvements articulaires ; point de départ essentiel à toute étude biomécanique.

Cependant elle constitue un véritable challenge technique car les mouvements considérés sont caractérisés par de très faibles amplitudes. Les études sur la cinématique de la colonne vertébrale, se sont développées en grande partie grâce aux progrès réalisés dans le domaine de l'informatique qui ont permis une récolte et un traitement des données plus efficace et approfondi.

Comme pour les membres , elles sont basées sur le traitement par un système informatique d'analyse cinématique 2-D ou 3-D des données d'un enregistrement cinématographique d'un cheval en mouvement sur lequel sont placés des marqueurs. Deux types de marquages peuvent être utilisés : invasif ou non invasif.

Les progrès technologiques réalisés à la fin des années 90 ont permis à ces méthodes de donner des résultats exploitables pour déterminer les mouvements propres du dos.

3311. PRÉSENTATION DES PROTOCOLES EXPÉRIMENTAUX

33111. PROTOCOLES EXPERIMENTAUX UTILISANT UN MARQUAGE NON INVASIFS

Le marquage non invasif consiste à disposer sur la peau des marqueurs sphériques réfléchissants. L'évaluation de la cinématique de la colonne vertébrale se fait en plaçant ce type de marqueurs sur la ligne du milieu du dos en regard des processus épineux dont on souhaite déterminer les mouvements.

La récolte des données peut en théorie être réalisée de deux façons différentes ; soit en terme de déplacement absolu des marqueurs dans l'espace soit en terme de variation des angles formés par les segments délimités par les marqueurs. Dans la pratique il semble que ce type de marquage ne donne des résultats fiables qu'en terme de déplacement angulaire, ce qui permet seulement d'étudier la mobilité régionale de la colonne vertébrale (Cf. figure n°49). En effet, il semble que l'utilisation d'un marquage cutané dans les études cinématiques introduit un certain nombre d'approximations qui limitent la précision des résultats. (Faber et coll. 2001c)

Les premières hypothèses sont introduites par le raisonnement sur les variations angulaires des segments définis par deux marqueurs successifs. Nous retrouvons ainsi un modèle de système de tiges articulées où des segments corporels incluant plusieurs articulations intervertébrales sont assimilés à des tiges rigides et indéformables (Faber et coll. 2001c). [Cf. 2^{ième} partie, § 131]

Cependant, la cinématique vertébrale régionale n'est pas forcément représentative de la cinématique propre aux segments vertébraux autrement dit les mouvements des vertèbres les unes par rapport aux autres. Or, pour appliquer ce modèle il faut supposer que si la colonne vertébrale subit un mouvement ondulatoire qui se propage au fur et à mesure des articulations intervertébrales alors au sein d'un segment l'amplitude de rotation doit être la même pour toutes les articulations.

Ainsi le choix de la position des marqueurs n'est pas anodin, il repose en partie sur les régions fonctionnelles définies dans les études *in vitro*.

Les premières études publiées furent réalisées dans le but de mettre au point une méthode, permettant de quantifier les mouvements du dos chez des chevaux trotant sur une piste dans les conditions de routine d'un examen orthopédique. Dans un premier temps un protocole permettant d'évaluer la fiabilité et la précision de la méthode fut mis en place (Pourcelot et coll. 1998, Audigé et coll. 1999).

Des enregistrements réalisés avec une première série de marqueurs M1, M2, M3 et M4. Afin d'isoler les mouvements propres du dos les positions des marqueurs ont été recalculées dans un système de coordonnées relié au tronc.

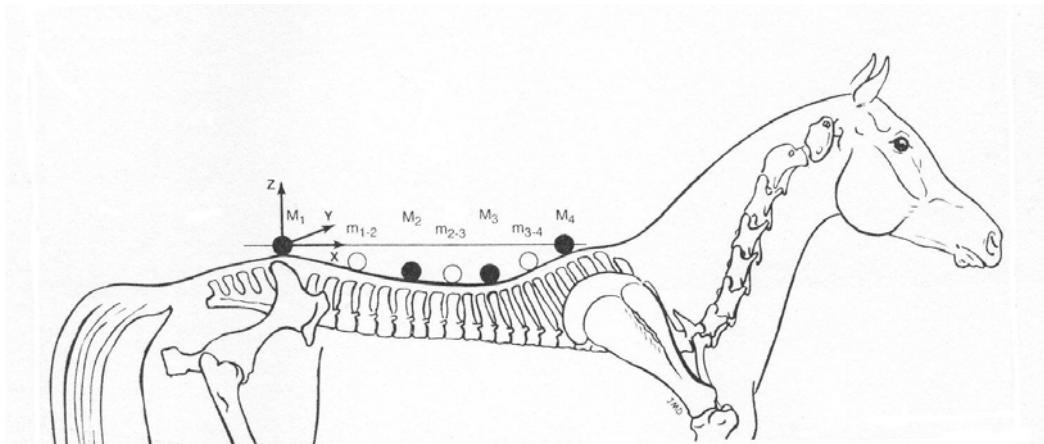


Figure n°48. Positions des marqueurs et du système de coordonnées qui fut utilisé pour valider la méthode.
(Pourcelot et coll. 1998)

Le repère utilisé a pour origine les tuber sacrale et l'axe longitudinal (axe des x) est défini par la droite passant par M₁ et M₄. M₁, M₂, M₃ et M₄ placés respectivement au niveau des tuber sacrale, sur le sommet des processus épineux de T18 ou de L1 et de T12 ou de T13 et au niveau du garrot en regard de T5 ou T6.

Dans ce repère, les tuber sacrale sont donc statiques et le garrot ne peut se déplacer que le long de l'axe des x.

Puis, pour chaque image l'équation du polynôme du troisième degré passant par les quatre marqueurs a pu être déterminée. Grâce à ces équations il fut alors possible d'interpoler le déplacement dans le plan sagittal de n'importe quel point situé le long de la colonne thoraco-lombaire entre le garrot et les tuber sacrale.

La fiabilité de la méthode fut alors évaluée par des enregistrements avec une seconde série de marqueurs m₁₋₂, m₂₋₃ et m₃₋₄, placés au milieu des segments définis par les quatre premiers marqueurs. Les résultats expérimentaux furent ainsi comparés aux résultats théoriques obtenus par interpolation.

(Cf. figure n°48)

Les valeurs expérimentales et théoriques ne présentaient pas de différences statistiquement significatives, sauf au niveau de la région lombaire. En effet, si la forme générale du tracé du déplacement vertical théorique du marqueur m₁₋₂ n'était pas altérée, en revanche son amplitude se trouvait amplifiée de 17%. Cette étude a donc validé le modèle du système de tiges articulées tout en soulignant l'existence de régions à mobilité particulière d'où la réelle importance dans ce type de protocoles du positionnement des marqueurs.

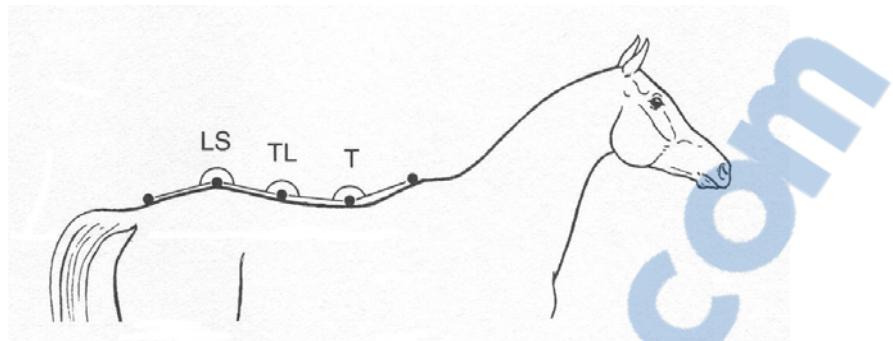


Figure n°49. Disposition des marqueurs permettant d'évaluer la mobilité dorsale.

(Audigié et coll. 1999)

trois angles sont ainsi définis :

thoracique (T), thoraco-lombaire (TL) et lombo-sacral (LS).

Les cinq marqueurs ont été disposés sur la ligne médiale du dos de la manière suivante : sur le garrot, au niveau de T12-T13, sur la jonction thoraco-lombaire, sur les tuber sacrale et sur la jonction sacro-coccigienne.

Plusieurs études ont par la suite évalué la mobilité dorsale avec comme objectif principal de proposer un outil de diagnostic clinique grâce à un protocole permettant une quantification objective de la mobilité dorsale. (Audigié et coll. 1999, Licka et Peham 1998, Licka et coll. 2001a, b, Faber et coll. 2001c, 2002)

Cependant, l'analyse de la cinématique de la colonne vertébrale par ce type de méthode semble être techniquement limitée. En effet, aux hypothèses associées au modèle des tiges articulées il faut aussi ajouter encore deux sources d'approximations d'ordre technique.

D'une part, l'assimilation des déplacements des marqueurs cutanés à ceux des structures osseuses sous jacentes peut être une source d'erreurs non négligeable. (Audigié et coll. 1999, Faber et coll. 2001c) En effet ce type de marqueur ne représente que les déplacements de la peau ; ils ne sont donc pas le reflet direct des mouvements des os sous jacents. Ce type d'artefacts a été étudié sur les membres ; il a été montré que pour la partie proximale des membres postérieurs le décalage entre le marqueur et l'articulation pouvait atteindre quelques centimètres. (Audigié et coll. 1998) Pour le dos le décalage potentiel n'a pas été quantifié mais une étude comparative entre la méthode invasive et le marquage cutané conclue que ces artefacts doivent être pris en compte dans l'analyse des résultats. (Faber et coll. 2001c)

D'autre part, l'analyse informatique du mouvement vertébral ne peut être réalisé que par une approche par des projections en deux dimensions. Les données sont projetées sur un plan, les mouvements en dehors de ce plan n'étant pas pris en compte. Or, la colonne vertébrale est animée à l'origine de mouvements dans les trois dimensions de l'espace. De même que pour les artefacts liés à la peau, il a

été évalué que ce type d'approximation pourrait affecter significativement la fiabilité des résultats notamment pour la mesure de la latéro-flexion au pas dans la région centrale de la colonne thoraco-lombaire. (Faber et coll. 2001c)

33112. PROTOCOLES EXPERIMENTAUX UTILISANT UN MARQUAGE INVASIF

Les premières estimations des mouvements vertébraux de la colonne thoraco-lombaire et du bassin dans les trois dimensions de l'espace ont été obtenues grâce à un protocole expérimental réalisé sur tapis roulant et utilisant une méthode invasive. (Faber et coll. 2000, 2001a et 2001b, Haussler et coll. 2001)

L'analyse de la locomotion sur tapis roulant présente l'avantage de réduire les variations potentielles, en permettant d'obtenir des données dynamiques sur des périodes continues à vitesse constante et allure régulière sans trop altérer les caractéristiques naturelles des allures sur le terrain (Fredricson et coll. 1983, Haussler et coll. 2001).

Les méthodes dites invasives consistent à planter des aiguilles dites de « Steinman » dans les processus épineux des vertèbres, sous simple sédation et anesthésie locale. Des marqueurs sont par la suite fixés à ces aiguilles afin de faciliter la récolte des données. Seulement quelques heures après la sédation, les chevaux sont filmés au trois allures à l'aide de caméras positionnées autour du tapis roulant. Les données ainsi récoltées sont converties grâce des traitements et des calculs informatisés complexes qui ont permis d'obtenir pour chaque vertèbre munies d'un dispositif de marqueurs un graphique représentant ses mouvements angulaires moyens en fonction du pourcentage du cycle de la foulée (sur plusieurs cycles de foulées). Les aiguilles de Steinman sont retirées immédiatement après la récolte des données.

Ce type de méthodes dites invasives permet ainsi de limiter les artéfacts liés au marquage cutané (Faber et coll. 2000, Haussler et coll. 2001). D'après les observations cliniques ces procédures semblent être bien tolérées. Cependant, la douleur induite et sa répercussion sur la locomotion n'a pas réellement été évaluée (Haussler et coll. 2001).

✓ La première équipe ayant utilisé une telle méthode, a mis en place un protocole permettant d'évaluer les mouvements absolus des vertèbres dans les trois dimensions de l'espace et aux trois allures.

(Faber et coll. 2000, 2001a et b)

Pour cela, ils ont implanté des aiguilles de « Steinmann » dans les processus épineux des vertèbres suivantes ; T6, T10, T17, L1, L3, L5 et S3 et dans les deux tuber coxae et y ont fixé des dispositifs comprenant quatre marqueurs sphériques afin de réaliser une analyse vidéo 3D aux différentes allures. Ce protocole a inclus cinq chevaux ne présentant pas de problèmes de dos.

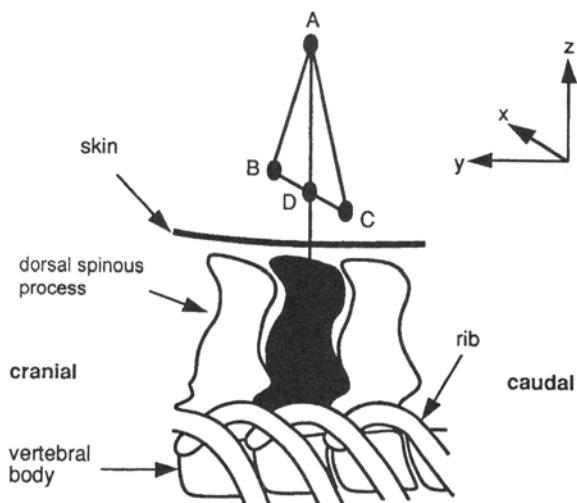


Figure n°50. Schéma du dispositif de marqueurs implanté dans le processus épineux d'une vertèbre.

(Faber et coll. 2000)

Le système est orienté dans un repère orthonormal direct (x,y,z). Les marqueurs sont indiqués par les lettres A,B,C,D.

✓ Parallèlement une autre équipe de recherche s'est attachée à décrire la cinématique du segment vertébral, grâce à un protocole permettant de quantifier les mouvements entre deux vertèbres adjacentes.

(Haussler et coll. 2001).

Trois chevaux sains ont été intégrés dans cette étude.

Des aiguilles de « Steinmann » ont été implantées sur les processus épineux de T15, T16, L2, L3, L6 et S2 (cheval 1) T14, T15, L1, L2, L6 et S1 (cheval 2) T14, T15, L1, L2, L5 et S2 (cheval 3). Puis, un transducteur composé de six indicateurs de tension en métal liquide fut fixé sur chaque couple d'aiguilles adjacentes. Ces jauge mesurent des différences de voltage à partir des quelles il est possible de calculer les déplacements angulaires du centre de l'articulation intervertébrale. Ce modèle étant actuellement le plus proche du modèle du segment vertébral que nous avons déjà décrit. (« segment motion » des anglo-saxons) [cf. 2^{ème} partie, § 312]

Le principal inconvénient des méthodes invasives est la lourdeur de la mise en place des protocoles pour les équipes de chercheurs et surtout pour les animaux. Par conséquent la taille des échantillons est réduite à un minimum, ce qui peut statistiquement interférer avec la fiabilité des résultats.

De plus, l'implantation des aiguilles de « Steinmann » dans L6 est techniquement difficile à réaliser à cause de la localisation relativement profonde de son processus épineux et de son apex étroit (Haussler et coll. 2001). Lors de la réalisation des protocoles, certaines d'entre elles ont été perdues et n'ont donc pas servi aux calculs. Ainsi, pour certains résultats le trop faible nombre d'individus pris en compte dans les échantillons a rendu les résultats statistiquement non interprétables pour l'articulation lombo-sacrée. (Faber et coll. 2001a, Haussler et coll. 2001)

Enfin lors de la récolte des données, d'autres sources d'erreurs peuvent affecter la fiabilité des résultats ; notamment les éventuelles déformations et oscillations que peuvent subir les marqueurs et les aiguilles, les distorsions dues aux lentilles qui déforment l'image réelle dans certains plans du champ de vision et les approximations dans les repères car la trajectoire du cheval ne peut rester idéalement parallèle à un axe longitudinal donné. (Faber et coll. 2001a).

3312. RESULTATS

Toutes les études sur la cinématique de la colonne vertébrale thoraco-lombaire ont trouvé des résultats similaires en ce qui concerne le schéma général de la cinématique vertébrale (« mouvement pattern » des anglo-saxons), ce qui d'une certaine manière permet de valider l'ensemble des méthodes utilisées même si l'analyse de certains mouvements est limitée avec certaines d'entre elles (Faber et coll. 2001c).

Toutefois, on observe quelques différences entre les résultats de ces études ; elles portent essentiellement sur les amplitudes de rotation et la répartition du schéma cinématique en fonction du pourcentage de la foulée.

La comparaison des amplitudes de rotation obtenues dans les différentes études est difficile car elles utilisent toutes des protocoles différents. Ainsi, les variations peuvent s'expliquer en grande partie par des mesures segmentaires ou régionales ne comprenant pas le même nombre d'articulations intervertébrales, des vitesses différentes dans les allures testées et des méthodes et des unités de mesures variées. (Faber et coll. 2001a et 2002, Haussler et coll. 2001)

Ainsi, une étude réalisée au trot sur tapis roulant, a montré une corrélation négative entre la vitesse et l'amplitude de flexion et d'extension de la charnière

thoraco-lombaire, et que parallèlement, la région thoracique crâniale et la zone lombo-sacrée ne semblent pas être affectées par l'augmentation de la vitesse (Robert et coll. 2001)

Les différences dans la répartition du schéma cinématique en fonction du pourcentage de la foulée peuvent être attribuées à des variations dues aux méthodes de détermination du moment du contact du sabot avec le sol. Nous avons vu que la détermination du « timing » se faisait grâce à des relevés cinématographiques et/ou accélérométriques réalisés simultanément aux enregistrements des données cinématiques. Or la précision de ces méthodes semble être variable. (Faber et coll. 2002)

Enfin, la cinématique vertébrale a montré une très haute répétitivité pour un même individu (Audigé et coll. 1999, Faber et coll. 2000 et 2002, Haussler et coll. 2001)

Cependant, comme pour les caractéristiques spatio-temporelles de la foulée, les variations inter-individuelles sont plus importantes que celles observées chez un même individu. Par ailleurs, les chevaux peuvent atteindre le même schéma cinématique par différentes combinaisons de rotations vertébrales. Ainsi on peut penser que les mouvements de la région axiale seraient des caractéristiques individuelles fortement influencées par des préférences individuelles, la conformation et les caractères anatomiques. (Haussler et coll. 2001, Faber et coll. 2002)

33121. INTERPRETATION DES RESULTATS GRAPHIQUES

Dans l'ensemble des études abordées ici, (Audigé et coll. 1999, Licka et coll. 2001a et b, Faber et coll. 2000, 2001a, b, Haussler et coll. 2001) l'interprétation des graphiques représentant un mouvement angulaire en fonction du temps se fait selon le même principe.

Il s'agit de décrire des rotations et/ou variations d'angles suivant les trois dimensions de l'espace. Par convention dans le texte le mouvement d'une vertèbre est décrit par rapport à la vertèbre caudale adjacente.

Dans certains cas, la position d'une vertèbre est comparée à sa position moyenne observée tout au long d'un cycle de marche. (Faber et coll. 2000, 2001a, b , Licka et coll. 2001a, b)

(Cf. figures n°51 et n°52)

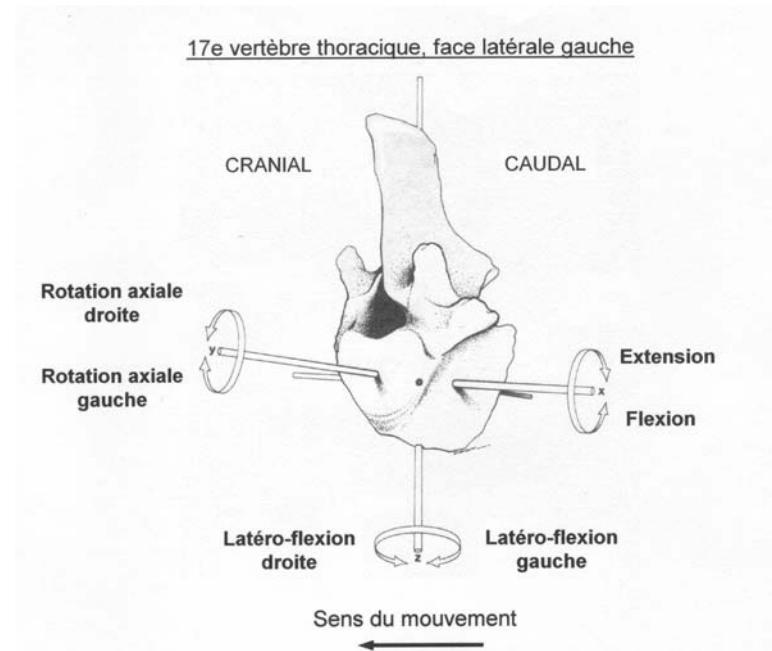
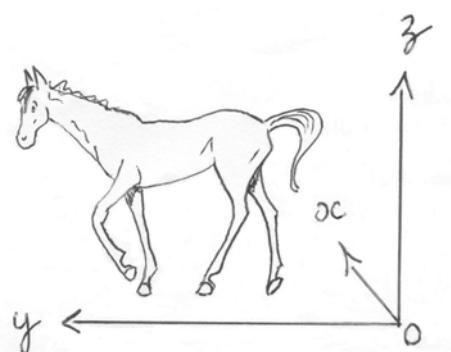


Figure n°51. Interprétations des rotations dans un repère orthonormé

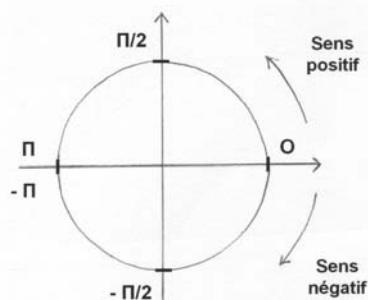
(adapté d'après Townsend et coll. 1983)

Sur le cercle trigonométrique représenté de façon conventionnelle, une rotation est négative lorsqu'elle va dans le sens des aiguilles d'une montre et positive dans le sens opposé. Ceci, peut prêter à confusion lorsque le raisonnement a lieu dans un espace à trois dimensions car ce même cercle présente alors un recto et un verso où le sens des rotations est opposé.



Repère orthonormal direct

(L'axe longitudinal est orienté positivement en direction du mouvement en avant et l'axe vertical est orienté positivement vers le haut)



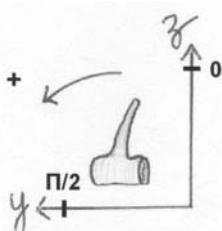
Cercle trigonométrique «conventionnel»

Rotation négative = sens des aiguilles d'une montre

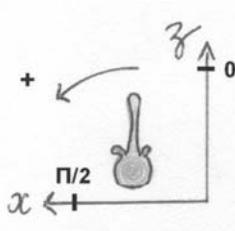
Rotation positive = sens inverse des aiguilles d'une montre.

Figure n°52.

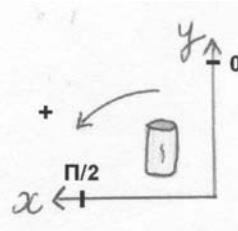
Par exemple, dans un repère orthogonal direct dont l'axe longitudinal est orienté positivement en direction du mouvement en avant et l'axe vertical est orienté positivement vers le haut, le sens des rotations s'interprète de la manière suivante ; (Cf. figures n°53 a et b)



Plan longitudinal
Profil gauche



Plan transversal
Vue crâniale

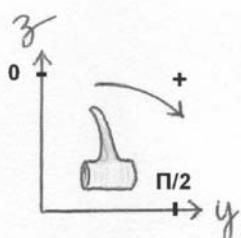


Plan horizontal
Vue ventrale

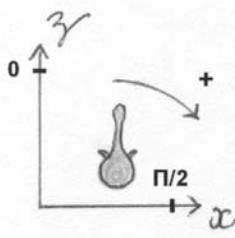
Figure n°53a. Exemple des sens de rotation d'une vertèbre thoracique placé dans un repère orthonormal direct

(L'axe longitudinal est orienté de l'arrière vers l'avant et l'axe vertical du bas vers le haut)
la flèche indique le sens positif de rotation.

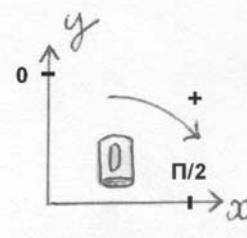
Les trois plans de l'espace sont représentés selon le cercle trigonométrique vue de sa face « conventionnelle » (tourné de 90° vers la gauche).



Plan longitudinal
Profil droit



Plan transversal
Vue caudale



Plan horizontal
Vue dorsale

Figure n°53b. Exemple des sens de rotation d'une vertèbre thoracique placée dans un repère orthonormal direct

(L'axe longitudinal est orienté de l'arrière vers l'avant et l'axe vertical du bas vers le haut)
la flèche indique le sens positif de rotation.

Les trois plans de l'espace sont représentés selon le cercle trigonométrique vue de sa face contraire (tourné de 90° vers la droite).

Ainsi dans l'exemple d'un repère orthonormal direct orienté comme dans l'exemple exposé ci-dessus, sur les graphiques nous en déduisons que :

⇒ Dans le plan longitudinal (rotation autour de l'axe des x) une pente positive correspond à un mouvement de flexion et une pente négative à un mouvement d'extension.

- ⇒ Dans le plan transversal (rotation autour de l'axe des y) une pente positive correspond à un mouvement de rotation axiale vers la droite du cheval et une pente négative à un mouvement de rotation axiale vers la gauche du cheval.
- ⇒ Dans le plan horizontal (rotation autour de l'axe des z) une pente positive correspond à un mouvement de latéro-flexion droite (c'est-à-dire entraînant une concavité sur la droite du cheval) et une pente négative à un mouvement de latéro flexion gauche (c'est-à-dire entraînant une concavité sur la gauche du cheval).

33122. DESCRIPTION DE LA CINÉMATIQUE VERTEBRALE AU PAS

Faber et coll. 2000 (Cf. figures n°55 et 58)

Licka et coll. 2001a (Cf. figures n°56 et 57)

Haussler et coll. 2001 (Cf. figure n°54)

Nous avons déjà vu que le pas est une allure marchée, symétrique composée de quatre temps égaux. [Cf. 2^{ième} partie, § 31122]

Premier temps : poser du postérieur gauche. Le postérieur droit est en fin de propulsion, l'antérieur droit à mi appui et l'antérieur gauche à mi soutien.

Deuxième temps : poser de l'antérieur gauche. L'antérieur droit est en fin de propulsion, le postérieur gauche à mi appui et le postérieur droit à mi soutien.

Les deux autres temps sont les symétriques des deux premiers par rapport au plan médian.

Troisième temps : poser du postérieur droit

Quatrième temps : poser de l'antérieur droit

✓ Pour les mouvements de **flexion et d'extension**, les graphiques du schéma cinématique se présentent sous une forme périodique et sinusoïdale comprenant deux oscillations complètes durant chaque foulée.

Lors du poser des postérieurs (premier et troisième temps), la colonne vertébrale réalise une extension qui atteint un maximum lorsque les postérieurs controlatéraux se lèvent. La tête réalise un mouvement similaire, elle s'abaisse jusqu'à ce que les postérieurs controlatéraux se lèvent moment où elle est à sa position la plus basse.

La colonne vertébrale amorce alors une phase de flexion. Cette flexion est maximale lors du poser des antérieurs (deuxième et quatrième temps). La tête

qui se relève simultanément, atteint sa position la plus haute après le poser des antérieurs et avant que les antérieurs controlatéraux se lèvent.

On observe un décalage temporel entre les vertèbres, les mouvements de flexion et d'extension sont d'abord initiés au niveau de la région pelvienne, puis au niveau de la zone thoracolombaire et enfin de la région thoracique crâniale. Ainsi, ce type de mouvement semble se propager de la zone sacro lombaire vers la région thoracique crâniale.

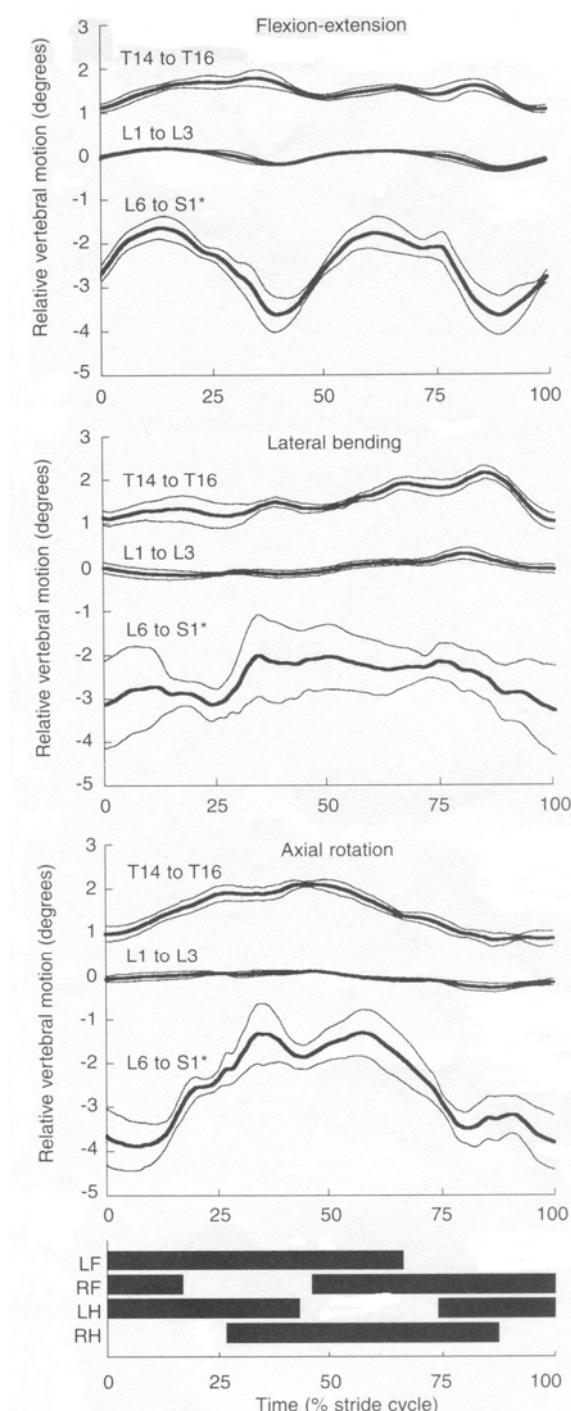


Figure n°54.

Valeur moyenne (ligne épaisse) +/- l'intervalle de confiance de 95% (lignes fines) du mouvement angulaire de segments vertébraux pendant un cycle complet d'une foulée de pas.

(Vitesse de 1.8 m/s)

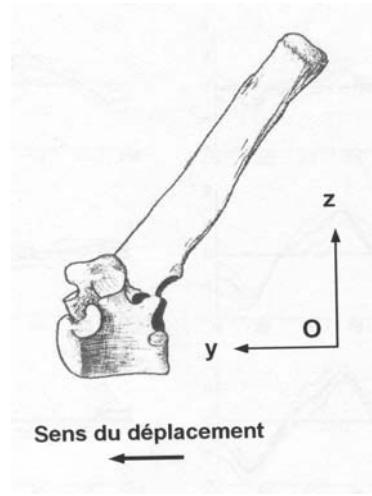
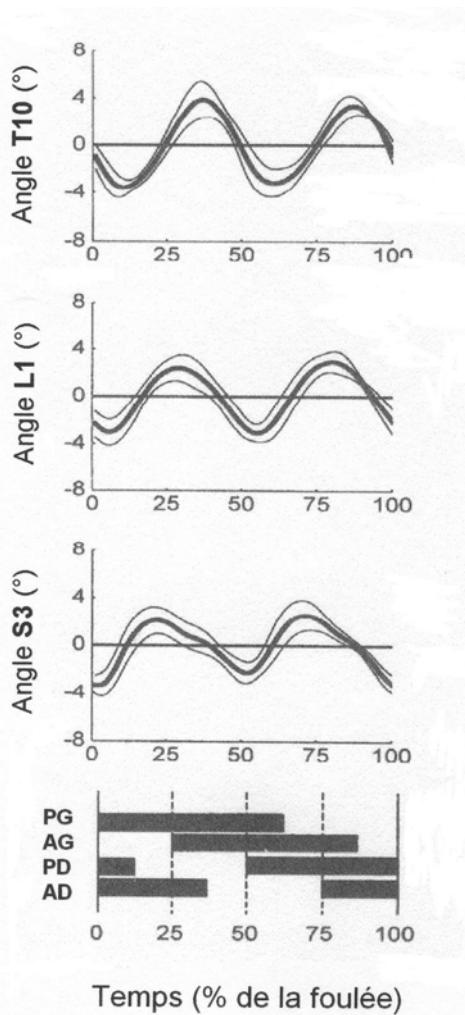
(Haussler et coll. 2001)

Sur la courbe, une pente positive correspond à une flexion ou à une latéro-flexion gauche ou à une rotation gauche.

Pour un segment vertébral, le mouvement est décrit comme celui de la vertèbre crâniale par rapport à la vertèbre caudale adjacente.

Les barres horizontales indiquent la phase d'appui de chaque membre. (LF=antérieur gauche, RF=antérieur droit, LH= postérieur gauche et RH=postérieur droit)

* moyennes calculées à partir des données provenant de seulement de deux chevaux.



T5 profil gauche

Figure n°55. Exemple de schéma cinématique représentant les rotations des vertèbres dans le plan longitudinal en fonction du pourcentage du cycle de la foulée, chez un cheval sain au pas (vitesse de 1.6 m/s)

(Faber et coll. 2000)

Les barres noires indiquent les phases d'appui. PG = postérieur gauche, AG = antérieur gauche, PD = postérieur droit et AD = antérieur droit.

Sur la courbe, une pente positive s'interprète comme une flexion et une pente négative comme une extension.

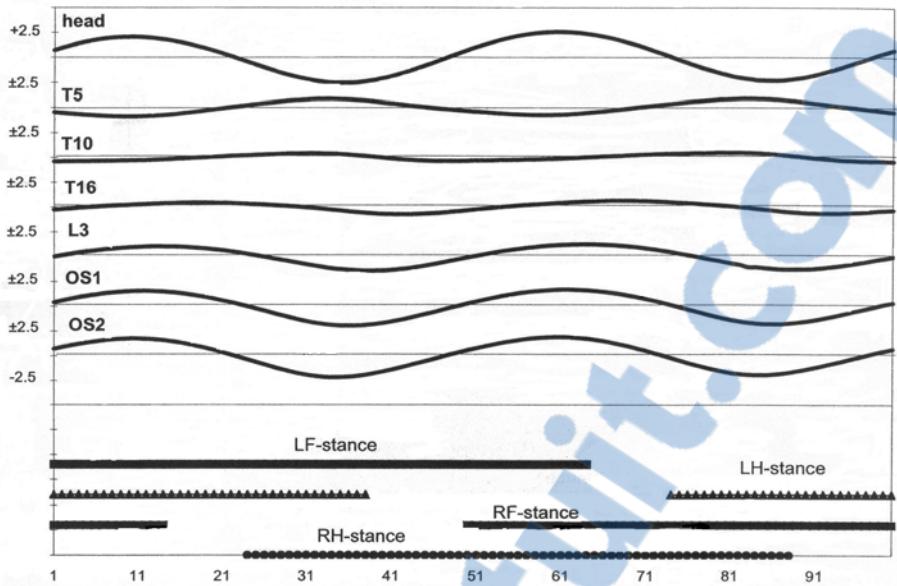


Figure n°56. Exemple de schéma cinématique représentant la position moyenne sur l'axe vertical de marqueurs cutanés par rapport à une position de référence en fonction du pourcentage du cycle de la foulée, chez un cheval sain au pas

(Licka et coll. 2001a)

Les marqueurs sont placés en regard des processus épineux sur la ligne médiale du dos et au milieu d'un segment rejoignant les deux yeux. Les marqueurs OS1 et OS2 sont respectivement placés crânialement et caudalement sur l'os sacrum.

La position est calculée en terme de pourcentage de la hauteur au garrot. Les lignes horizontales associées à chaque courbe représentent les positions de référence des marqueurs. Ces positions de référence sont calculées en affectant la valeur de zéro à la valeur de la position moyenne d'un marqueur sur un cycle complet d'une foulée. Sur le graphique, les valeurs au dessus de ces lignes correspondent à une position plus haute et au dessous à une position plus basse des marqueurs par rapport à leur position de référence.

✓ Pour les mouvements de latéro-flexion, les graphiques du schéma cinématique se présentent sous une forme périodique et sinusoïdale comprenant une oscillation complète durant chaque foulée.

Juste avant le poser des postérieurs (premier et troisième temps), la tête et la région pelvienne atteignent des positions extrêmes du côté des postérieurs controlatéraux. Parallèlement, la colonne thoraco-lombaire est à un maximum de latéro-flexion, la concavité se trouvant du côté du postérieur qui va se poser. Autrement dit, lors du poser du postérieur gauche, la tête et la région pelvienne sont à droite du plan médian et la colonne thoraco lombaire est en latéro-flexion gauche.

Lors du poser des antérieurs (deuxième et quatrième temps), l'ensemble de la région axiale est aux environs d'une position neutre, c'est-à-dire à peu près alignée sur le plan médian.

✓ Pour les mouvements de **rotation axiale**, les graphiques du schéma cinématique se présentent aussi sous une forme périodique et sinusoïdale comprenant une oscillation complète durant chaque foulée.

Lors du poser des postérieurs (premier et troisième temps), les vertèbres tournent vers les postérieurs controlatéraux et atteignent une position extrême après que ces derniers se soient levés.

Lors du poser des antérieurs (deuxième et quatrième temps), les processus épineux des vertèbres sont donc du côté du postérieur au soutien et amorcent une rotation vers le postérieur à l'appui.

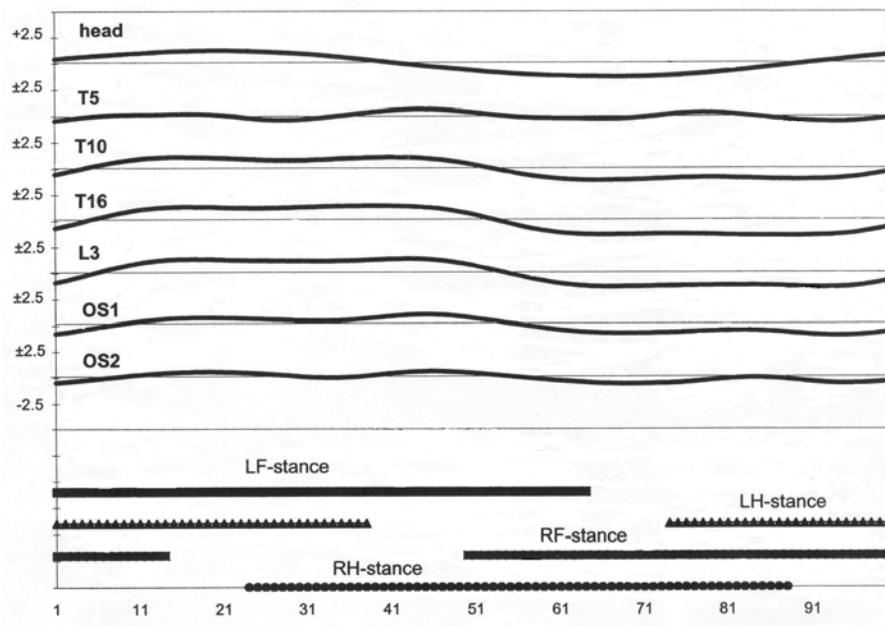


Figure n°57. Exemple de schéma cinématique représentant la position moyenne sur l'axe transversal de marqueurs cutanés par rapport à une position de référence en fonction du pourcentage du cycle de la foulée, chez un cheval sain au pas

(Licka et coll. 2001a)

Les marqueurs sont placés en regard des processus épineux sur la ligne médiale du dos et au milieu d'un segment rejoignant les deux yeux. Les marqueurs OS1 et OS2 sont respectivement placés crânialement et caudalement sur l'os sacrum.

La position est calculée en terme de pourcentage de la hauteur au garrot. Les lignes horizontales associées à chaque courbe représentent les positions de référence des marqueurs. Ces positions de référence sont calculées en affectant la valeur de zéro à la valeur de la position moyenne d'un marqueur sur un cycle complet d'une foulée. Sur le graphique, les valeurs au dessus de ces lignes correspondent à une position à gauche et au dessous à une position à droite de leur position de référence.

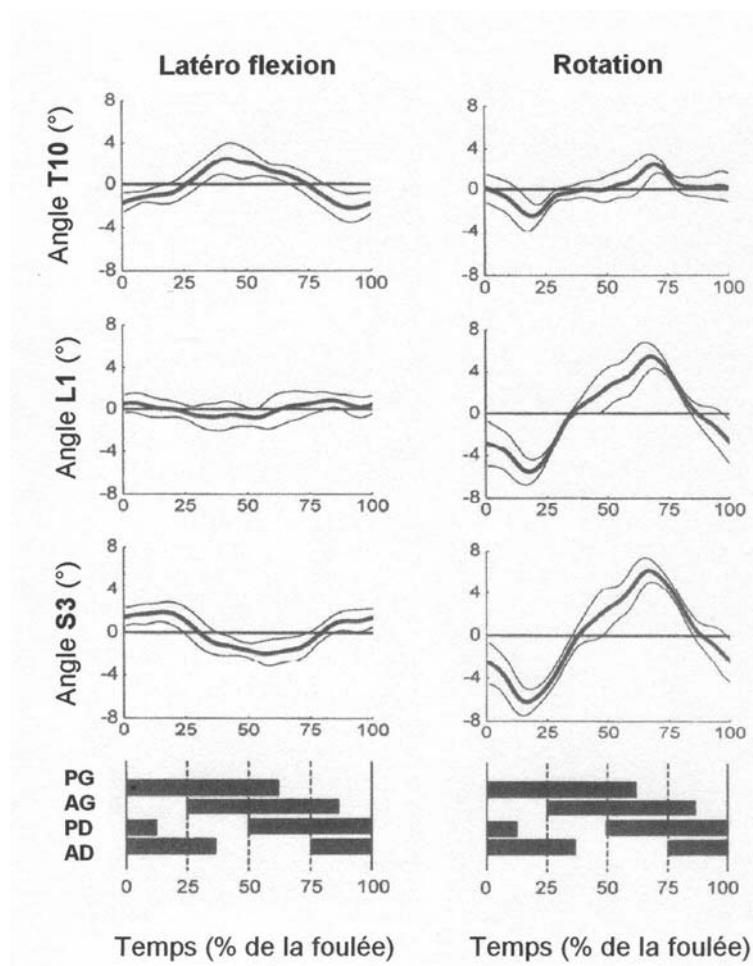


Figure n°58. Exemple de schéma cinématique représentant les variations angulaires de vertèbres dans le plan horizontal (latéro flexion) et le plan frontal (rotation axiale) en fonction du pourcentage du cycle de la foulée, chez un cheval sain au pas.

(Vitesse de 1.6 m/s)
 (Faber et coll. 2000)

Les barres noires indiquent les phases d'appui. PG = postérieur gauche, AG = antérieur gauche, PD = postérieur droit et AD = antérieur droit.

D'après le texte, une pente positive s'interprète comme une latéro-flexion droite ou une rotation gauche et une pente négative s'interprète comme une latéro-flexion gauche ou une rotation droite.

Le décalage temporel entre les vertèbres est moins évident pour la latéro-flexion et la rotation axiale que pour la flexion et l'extension.

Pour la latéro-flexion, les positions extrêmes ne sont pas toujours nettement définies, elles restent plutôt un temps autour d'un palier.

Pour la rotation axiale, toutes les vertèbres ont des mouvements quasiment simultanés, les régions caudales ayant simplement une très faible avance sur la région thoracique crâniale.



33123. DESCRIPTION DE LA CINÉMATIQUE VERTEbraLE AU TROT

Audigié et coll. 1999 (Cf. figure n°60)

Denoix et Audigié 2001b

Faber et coll. 2001a (Cf. figure n°61)

Licka et coll. 2001b (Cf. figure n°62)

Haussler et coll. 2001 (Cf. figure n°59)

Nous avons déjà vu que le trot est une allure symétrique composée de deux temps égaux par bipèdes diagonaux, séparés par des temps de suspension.

Un temps correspond à l'appui d'un bipède diagonal qui comprend trois phases ; d'abord poser et amortissement, puis mi appui et enfin propulsion et levée.

[Cf. 2^{ième} partie, § 31123]

Premier temps : appui du bipède diagonal droit.

Temps de suspension.

Deuxième temps : appui du bipède diagonal gauche.

Temps de suspension. ... etc.

✓ Pour les mouvements de **flexion et d'extension**, les graphiques du schéma cinématique se présentent sous une forme périodique et sinusoïdale comprenant deux oscillations complètes durant chaque foulée.

Lors du poser d'un bipède diagonal, la colonne thoraco-lombaire réalise une extension qui se poursuit pendant la phase d'amortissement pour atteindre un maximum autour du mi-appui. Puis durant la phase de propulsion et le début du temps de suspension, elle réalise une flexion qui est maximale au milieu du temps de suspension.

Bien que ses mouvements soient moins marqués qu'au pas, la tête suit aussi un cycle périodique similaire à la colonne thoraco-lombaire. Cependant, les diverses études ne rapportent pas les mêmes résultats en fonction du cycle de la foulée. D'après certains auteurs, elle atteint sa position la plus haute au début de chaque phase d'appui des bipèdes diagonaux et sa position la plus basse dans la première partie du temps de suspension (Licka et coll. 2001b). Pour d'autres, elle atteint un minimum à mi-appui et un maximum à la fin de l'appui ou au début du temps de suspension (Buchner et coll. 1996).

Cependant, toutes les vertèbres ne bougent pas en phase. En effet, on observe un décalage temporel entre elles, les maximums de flexion et d'extension sont d'abord atteints par la région thoracique puis par la zone thoraco-lombaire. Ainsi, contrairement au pas les mouvements de flexion et d'extension semblent comme se propager de la région thoracique crâniale vers la zone lombo-sacrée.

Enfin, l'amplitude des mouvements mesurée est relativement plus faible que pour les autres allures (pas et galop).

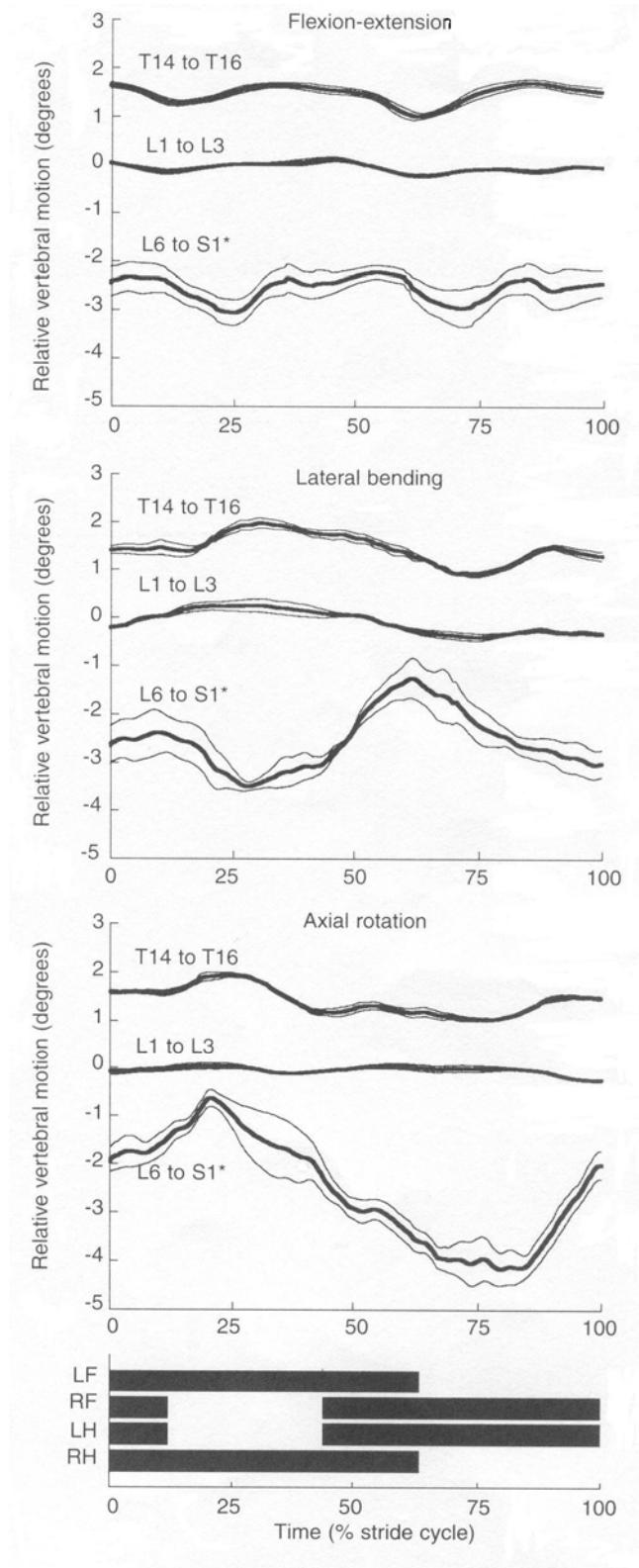


Figure n°59.

Valeur moyenne (ligne épaisse) +/- l'intervalle de confiance de 95% (lignes fines) du mouvement angulaire de segments vertébraux pendant un cycle complet d'une foulée de trot.

(Vitesse de 4 m/s)

(Haussler et coll. 2001)

Sur la courbe, une pente positive correspond à une flexion ou à une latéro-flexion gauche ou à un rotation gauche.

Les barres horizontales indiquent la phase de soutien (?) de chaque membre.
(LF=antérieur gauche, RF=antérieur droit,
LH= postérieur gauche et RH=postérieur droit) et 0% de la foulée = contact de l'antérieur gauche avec le sol.

* moyennes calculées à partir des données provenant de seulement de deux chevaux.

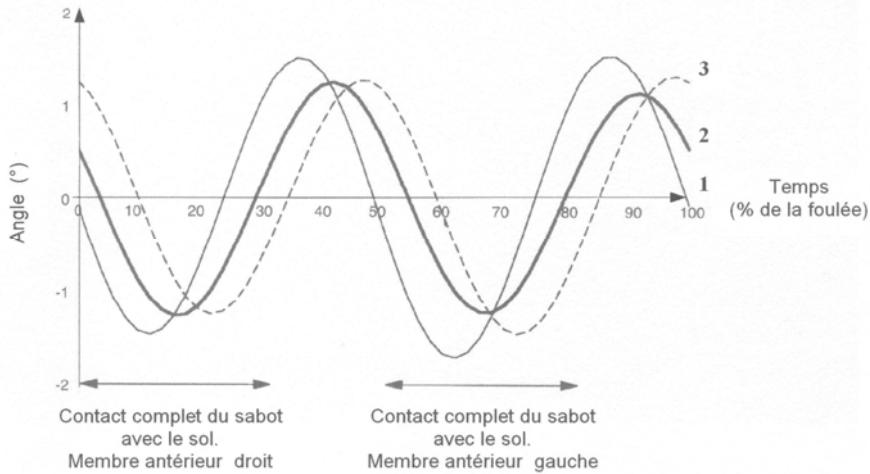


Figure n°60. Exemple de schéma cinématique représentant les variations des angles du dos dans le plan longitudinal en fonction du pourcentage du cycle de la foulée, chez un cheval sain au trot (vitesse de 3.16 m/s)

(Audigié et coll. 1999)

1 : angle thoracique (T12-T13), 2 : angle thoracolumbar (T18-L1), 3 : angle lombosacral (L6-S1).

Sur la courbe, une pente négative correspond à une diminution de l'angle définie par trois marqueurs successifs qui représente un mouvement d'extension du dos, une pente positive correspond au contraire à une augmentation de l'angle qui représente alors un mouvement de flexion.

✓ Pour les mouvements de **latéro-flexion**, les graphiques du schéma cinématique se présentent sous une forme périodique comprenant une oscillation complète durant chaque foulée.

Au moment du poser du diagonal droit (début du premier temps), la tête et la région pelvienne atteignent des positions extrêmes du côté droit du cheval. Parallèlement, la colonne thoraco-lombaire réalise une latéro-flexion gauche qui atteint son maximum juste après le mi-appui du diagonal pendant la phase de propulsion.

Puis, un mouvement de latéro-flexion droite s'amorce de telle sorte qu'autour du temps de suspension la région axiale est proche d'une position neutre.

Pendant la phase d'appui du diagonal gauche (deuxième temps), la région axiale est animée par des mouvements symétriques par rapport au plan médian.

✓ Pour la **rotation axiale**, le graphique se présente sous une forme cyclique plus complexe, avec pour chaque vertèbre trois périodes de rotation vers la droite et trois vers la gauche. Le cycle peut être séparé en deux phases de même durée, la seconde étant symétrique à la première par rapport à un plan vertical. Ainsi, pendant une première période, comprenant la phase d'appui du bipède diagonal droit (premier temps) et le temps de suspension précédent, les

processus épineux des vertèbres sont tournés vers la gauche du cheval. Inversement durant le deuxième temps et le temps de suspension précédent.

Au moment du poser du bipède diagonal droit les vertèbres réalisent une rotation vers la droite qui est amorcée depuis la seconde moitié du temps de suspension précédent. Autour du mi appui du bipède, elles tournent vers la gauche jusqu'à une position extrême à gauche et finissent la première période par une rotation vers la droite pour atteindre une position extrême à droite à la moitié du temps de suspension suivant. Le cycle se poursuit par une seconde période où la région axiale est animée par des mouvements symétriques par rapport à un plan vertical.

On observe un décalage temporel entre les vertèbres ; les rotations sont d'abord initiées au niveau du sacrum, puis de la région lombaire et enfin au niveau de la zone thoracique crâniale.

De même que pour les mouvements de flexion et d'extension, l'amplitude des mouvements est plus faible par rapport à celles mesurées dans les autres allures (pas et galop).

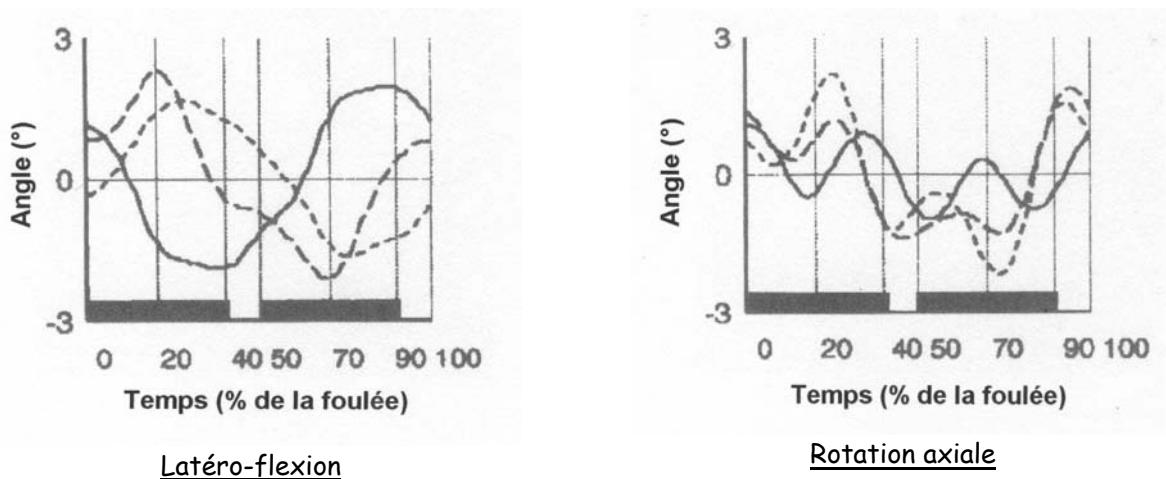


Figure n°61. Exemple schéma cinématique représentant les variations angulaires de vertèbres dans le plan horizontal (latéro flexion) et le plan frontal (rotation axiale) en fonction du pourcentage du cycle de la foulée, chez un cheval sain au trot.

(vitesse de 4 m/s)

(Faber et coll. 2001a)

ligne continue = T10, ligne discontinue = L1, ligne pointillée = S3.

Les barres noires indiquent les phases d'appui. (0% = poser du postérieur gauche)

Une pente positive s'interprète comme une latéro flexion droite ou une rotation gauche et une pente négative s'interprète comme une latéro flexion gauche ou une rotation droite.

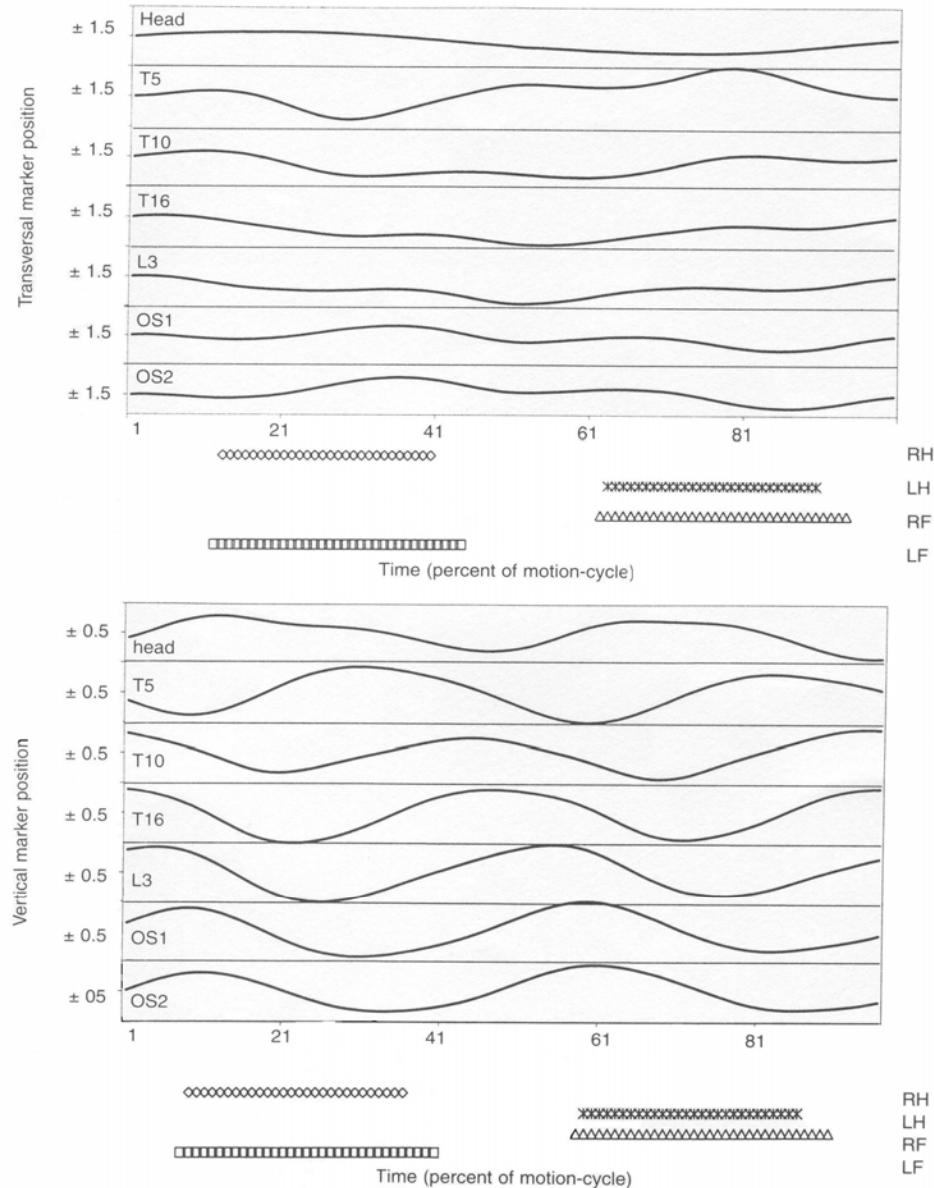


Figure n°62. Exemple de schéma cinématique représentant la position moyenne sur les axes vertical et transversal de marqueurs cutanés par rapport à une position de référence en fonction du pourcentage du cycle de la foulée, chez un cheval sain au trot

(Licka et coll. 2001b)

Les marqueurs sont placés en regard des processus épineux sur la ligne médiale du dos et au milieu d'un segment rejoignant les deux yeux. Les marqueurs OS1 et OS2 sont respectivement placés crânialement et caudalement sur l'os sacrum.

La position est calculée en terme de pourcentage de la hauteur au garrot. Les lignes horizontales associées à chaque courbe représentent les positions de référence des marqueurs. Ces positions de référence sont calculées en affectant la valeur de zéro à la valeur de la position moyenne d'un marqueur sur un cycle complet d'une foulée. Sur le graphique, les valeurs au dessus de ces lignes correspondent à une position plus haute ou à gauche et au dessous à une position plus basse ou à droite de leur position de référence.

33124. DESCRIPTION DE LA CINÉMATIQUE AU GALOP

Denoix et Audigié 2001b

Faber et coll. 2001b (Cf. figure n°64)

Haussler et coll. 2001 (Cf. figure n°63)

Le galop est une allure sautée, dissymétrique à trois temps et un temps de suspension. Certains parlent aussi d'allure basculée.

On dit qu'un cheval galope du côté de son bipède latéral meneur, le bipède latéral meneur se posant plus crânialement que son homologue controlatéral ; le bipède latéral poursuivant.

Une foulée de galop se décompose de la façon suivante :

- ⇒ poser du postérieur poursuivant (début du premier temps)
- ⇒ poser du bipède diagonal, postérieur meneur et antérieur poursuivant (début du deuxième temps)
- ⇒ poser de l'antérieur meneur (début de troisième temps)
- ⇒ temps de suspension.

[Cf. 2^{ième} partie, § 31124]

A l'heure actuelle les données disponibles sont moins complètes et moins fiables statistiquement sur la cinématique vertébrale au galop que sur celle du pas et du trot. En effet, les résultats des études utilisant une méthode invasive présentés ci-dessous, sont basés pour certains segments de vertébraux sur des données provenant de seulement un ou deux individus différents. Toutefois, les incertitudes ne concernent que les mouvements de latéro-flexion et de rotation axiale car les données complémentaires apportées par les études utilisant des techniques non invasives, permettent de décrire les schémas généraux des mouvements en flexion/extension.

✓ Pour les mouvements de **flexion et d'extension**, les graphiques du schéma cinématique se présentent sous une forme périodique comprenant une oscillation complète durant chaque foulée.

Durant la phase de suspension et le premier temps la colonne thoraco-lombaire réalise une extension. On observe une extension thoracique maximum lors du mi appui du diagonal et de la levée du postérieur poursuivant (fin du deuxième temps). Elle entame ensuite une flexion qui est maximale avant le début de la phase de suspension.

La tête suit de même un cycle périodique avec une oscillation par foulée. Elle est en position haute pendant la phase de suspension et en position basse à la fin du deuxième temps.

Ainsi, la phase de projection du tronc est opposée à celle de la tête, ce qui est en accord avec l'impression visuelle de roulement ondulatoire que l'on observe à cette allure (Gellman et Bertram 2002a)

De même que pour les autres allures les vertèbres ne bougent pas en phase ; les extrêmes sont atteints d'abord par les vertèbres de la région lombo-sacrée puis par celles de la zone thoracique crâniale.

L'amplitude de ce type de mouvement est beaucoup plus grande que dans les autres allures (pas et trot) et plus particulièrement au niveau de l'articulation lombo-sacrée où les amplitudes enregistrées sont largement supérieures au reste de la colonne thoraco-lombaire.

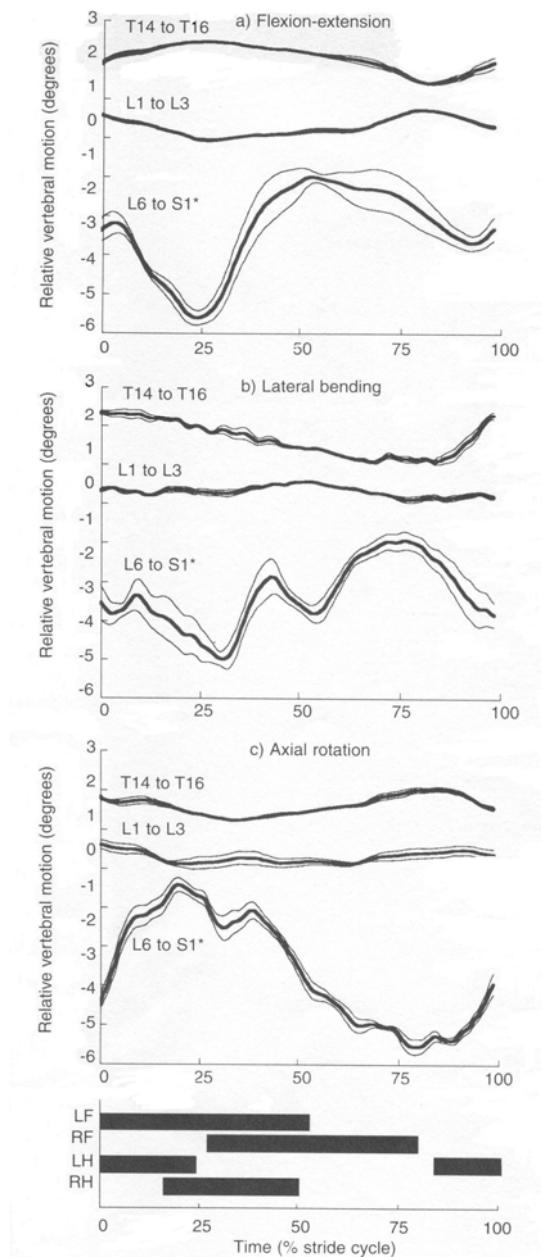


Figure n°63

Valeur moyenne (ligne épaisse) +/- l'intervalle de confiance de 95% (lignes fines) du mouvement angulaire de segments vertébraux pendant un cycle complet d'une foulée de galop à droite.

(Vitesse de 8.5 m/s)

(Haussler et coll. 2001)

Sur la courbe, une pente positive correspond à une flexion ou à une latéro-flexion gauche ou à un rotation gauche.

Les barres horizontales indiquent la phase d'appui de chaque membre. (LF=antérieur gauche, RF=antérieur droit, LH= postérieur gauche et RH=postérieur droit)

* moyennes calculées à partir des données provenant de seulement de deux chevaux.

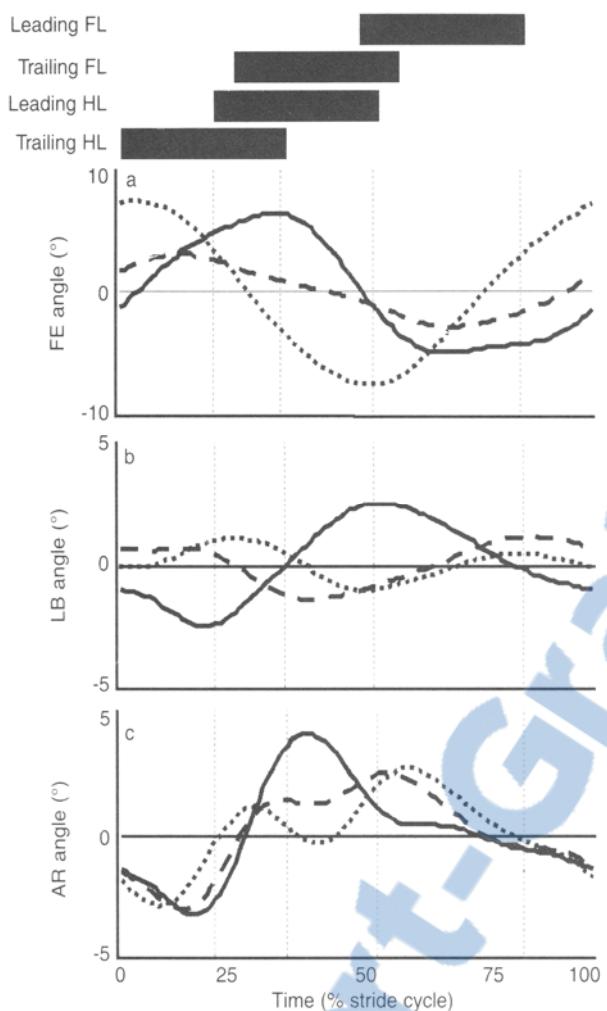


Figure n°64.

Exemple de schéma cinématique représentant les rotations absolues des vertèbres dans les trois dimensions de l'espace en fonction du pourcentage du cycle de la foulée, chez un cheval sain au galop à droite (vitesse de 7.3 m/s)

(Faber et coll. 2001b)

ligne continue = T10, ligne discontinue = L1,
ligne pointillée = S3.

Les barres noires indiquent les phases d'appui.

FE = flexion extension, une pente positive correspond à une extension

LB = lateral bending, une pente positive correspond à une latéro flexion droite

AR = axial rotation, une pente positive correspond à une rotation droite

FL = membre antérieur

HL = membre postérieur

Trailing = meneur, leading = poursuivant.

✓ Pour les mouvements de latéro-flexion, la cinématique vertébrale semble aussi répondre à un schéma périodique avec une oscillation par foulée.

Ainsi, durant le premier temps la colonne thoraco-lombaire réaliserait une latéro-flexion du côté du bipède latéral poursuivant qui serait maximum au cours du deuxième temps. Puis elle entamerait une latéro-flexion du côté du bipède latéral meneur et atteindrait un maximum autour de la phase de suspension.

Les mouvements de rotation axiale pourraient être couplés avec les mouvements de latéro-flexion sur l'ensemble du cycle de la foulée ; une latéro-fexion entraînant une rotation axiale vers le côté opposé (Haussler et coll. 2001).

Enfin, de même que pour les mouvements de flexion et d'extension, l'amplitude des mouvements de latéro-flexion et de rotation axiale est relativement plus grande que pour les autres allures et des amplitudes maximales sont observées autour de la région thoracique moyenne (T10).

3313. APPORTS ET LIMITES DE LA CINÉMATIQUE POUR L'ANALYSE BIOMÉCANIQUE DE REGION AXIALE

33131. ANALYSE DE L'AMPLITUDE DES MOUVEMENTS IN VIVO

Les études *in vitro* ont montré que la mobilité vertébrale varie le long de la colonne thoraco-lombaire en fonction de la conformation anatomique des vertèbres (Townsend et coll. 1983, Denoix 1999a). Les résultats obtenus *in vivo* sont en partie similaires avec ceux obtenus *in vitro* notamment au niveau des prédispositions anatomiques des régions vertébrales pour certains types de mouvements (Faber et coll. 2000, Haussler et coll. 2001).

En effet, l'analyse des données cinématiques *in vivo* montre que la jonction lombosacrale est le siège privilégié des mouvements de flexion et d'extension avec des amplitudes largement supérieures au reste de la colonne thoracolombaire, et que les plus grandes amplitudes en latéro-flexion et en rotation axiale ont été relevées au niveau des vertèbres thoraciques moyennes. Les vertèbres lombaires sont dans tous les cas animées de faibles mouvements dans les trois plans de l'espace. Parallèlement, les amplitudes des mouvements mesurées *in vivo* sont inférieures à celles mesurées *in vitro*. En effet, on peut penser que les expériences *in vitro* ont cherché à estimer des valeurs « limites » qui n'ont pas lieu d'être atteintes *in vivo* durant la locomotion. Il semble donc que seulement une fraction des mouvements anatomiquement possibles soit utilisée lors des allures naturelles (Faber et coll. 2000)

Enfin, l'amplitude des mouvements n'est pas la même en fonction des allures étudiées. C'est au galop qu'elle est la plus importante, tout particulièrement pour les mouvements de flexion et d'extension au niveau de l'articulation lombo-sacrale (Denoix et Audigé 2001b, Faber et coll. 2001b et Haussler et coll. 2001). Ainsi, la comparaison des amplitudes en flexion et en extension de l'articulation lombo-sacrale au trot et au galop, est en accord avec la théorie qui considère qu'au trot ce type de mouvements ne peut survenir de manière significative car les postérieurs sont toujours opposés (Rooney 1982).

Par ailleurs, l'amplitude des mouvements au trot est inférieure à celle mesurée au pas. Deux faits peuvent expliquer cette observation ; d'une part, le trot étant une allure sautée elle nécessite une plus grande tonicité du corps qui pourrait se traduire par une rigidification de la région axiale d'où des mouvements moins amples. D'autre part, la régulation et le contrôle de l'équilibration semblent plus marqués au pas ce qui nécessite des déplacements plus prononcés du centre de gravité, or les mouvements de latéro-flexion et de rotation axiale sont capables d'influencer ce phénomène (Faber et coll. 2001a).

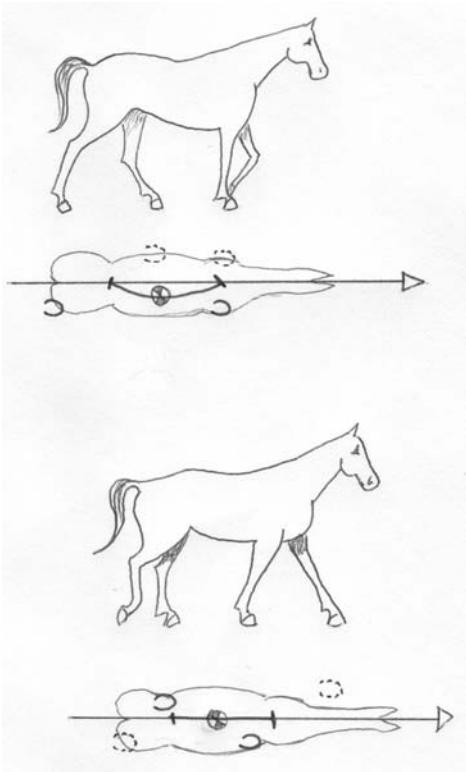
33132. ANALYSE DES MOUVEMENTS EN FONCTION DES PHASES DE LA FOULEE

L'analyse des résultats des études *in vivo* montre que la cinématique des segments vertébraux varie en terme de direction et d'amplitude en fonction des allures. Le schéma cinématique n'est pas le même au pas, au trot et au galop. Il semble par ailleurs fort probable qu'il existe une interaction directe entre les mouvements des membres et ceux de la colonne thoraco-lombaire (Licka et coll. 2001a et b, Faber et coll. 2000 et 2001b, Haussler et coll. 2001). On retrouve notamment dans les trois allures un lien entre la position des membres et les mouvements de flexion et d'extension de la colonne vertébrale. Ceci amène à un schéma biphasique dans les allures symétriques caractérisé par deux oscillations identiques à chaque cycle de foulée alors qu'au galop, allure asymétrique, le schéma est monophasique (Faber et coll. 2001b).

Ainsi, lors de la locomotion au pas, le décalage temporel entre la région thoraco-lombaire et la portion thoracique crâniale pour les mouvements de flexion et d'extension renforce l'idée que les membres postérieurs auraient un rôle principal dans la genèse des mouvements vertébraux en tant qu'agent propulseur via l'articulation sacro-iliaque (Faber et coll. 2000, Licka et coll. 2001a). En parallèle, l'analyse des mouvements de latéro-flexion et de rotation axiale en fonction des phases d'appui des membres pourrait indiquer que les membres antérieurs auraient principalement un rôle de support du tronc et pourraient servir de point de pivot à la colonne vertébrale (Licka et coll. 2001a et b et Faber et coll. 2000). De plus, d'après certains auteurs les mouvements de latéro-flexion pourraient être en partie expliqués par des mécanismes passifs et ainsi jouer un rôle dans la régulation de l'équilibration, notamment au pas (Faber et coll. 2001b).

(Cf. Figure n°65)

Par ailleurs, lors de la locomotion au trot, le décalage temporel pour les mouvements de flexion et d'extension est inversé par rapport à celui observé au pas ; ils semblent se propager d'avant vers l'arrière. Une étude *in vitro*, à montré que l'abaissement de l'encolure entraînait une flexion de la colonne thoraco-lombaire (Denoix 1987). Cependant d'après certains auteurs, les études *in vivo* montrent qu'au trot la colonne thoraco-lombaire réalise une extension pendant que la tête s'abaisse et une flexion quand elle se relève (Licka et coll. 2001b). Les mouvements de la tête ne semblent donc pas responsables *in vivo* et au trot de l'initialisation des mouvements de flexion et d'extension de la portion thoracique de la colonne vertébrale (Faber et coll. 2001a). Mais, l'abaissement de la tête pourrait aidé à limiter l'extension du tronc induite par l'accélération de la masse viscérale pendant la première partie de la phase d'appui au trot (Faber et coll. 2001a).



1^{er} temps : poser du postérieur gauche.

Base tripédale antérieure droite.

Latéro-flexion gauche de la colonne thoraco-lombaire.

Le centre de gravité est potentiellement déplacé à droite.

2^{ième} temps : poser de l'antérieur gauche.

Base tripédale postérieure gauche.

Pas de latéro-flexion de la colonne thoraco-lombaire.

Le centre de gravité est potentiellement sur l'axe médian.

Figure n°65. Mouvements de latéro-flexion de la colonne thoraco-lombaire lors d'une foulée de pas.

(d'après les résultats du § 33122)

Au contraire au pas et au galop, le segment tête-encolure semble jouer un rôle dans le mécanisme fondamental de l'allure. Ainsi, au pas les oscillations de la tête semblent suivre le mouvement pendulaire du reste du corps et il est probable qu'il y ait un lien dynamique notamment au travers du ligament nuchal, entre le mécanisme pendulaire des membres et celui des segments de la tête, de l'encolure et du tronc. De même au galop, les mouvements de flexion et d'extension en sens opposés des segments cervico-céphalique et thoracoluminaire pourraient contribuer à diminuer le travail musculaire en utilisant les capacités de stockage d'énergie élastique du ligament nuchal (Gellman et Bertram 2002b).

(Cf. figure n°66)

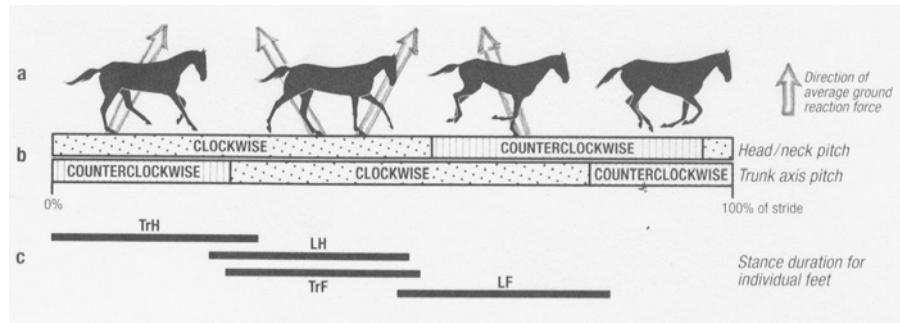


Figure n°66. Équilibre des moments au galop.

(Gellman et Bertram 2002b)

Les flèches montrent la direction moyenne des forces de réaction du sol (d'après Merkens et coll. 1993).

La colonne vertébrale est divisée en deux segments, un thoraco-lombaire et l'autre cervico-céphalique, tous les deux étant en rotation autour de la charnière cervico-thoracique supposée être au niveau de C7-T1.

L'énergie stockée dans le ligament nuchal est donc maximale pendant que la colonne thoraco-lombaire qui réalise une flexion, est projetée vers le haut et vers l'avant. Ainsi, elle vient en partie contre balancer la réaction du sol et aider le retour du tronc à une position neutre proche de l'horizontale.

33133. LES MOUVEMENTS COUPLES

On parle de mouvements couplés lorsqu'une rotation est systématiquement associée à une rotation sur un autre axe.

Des études *in vitro* ont montré l'existence de mouvements couplés de rotation axiale et de latéro-flexion dans la région thoracique et cervicale (Townsend et coll. 1983, Clayton et Townsend 1989a). Ces études *in vitro* décrivent qu'une latéro-flexion entraînent une rotation axiale qui entraîne les processus épineux vers la convexité de la courbe.

Une analyse cinématique au galop montre une forte corrélation entre la latéro-flexion et la rotation axiale au galop dans la zone thoracique moyenne en accord avec les études *in vitro* (Haussler et coll. 2001). Au trot il semble que cette corrélation soit présente sauf au début de la phase d'appui des bipèdes diagonaux (Faber et coll. 2001a). Au pas, aucune corrélation n'a pas été mise en évidence (Faber et coll. 2000 et Haussler et coll. 2001). Ainsi, on peut supposer que ces mouvements couplés ne se produiraient que dans des positions extrêmes des articulations en mouvement et que différents schémas cinématiques pourraient donc se produire lors des mouvements de faibles amplitudes (Haussler et coll. 2001).

33134. LES LIMITES

Les méthodes décrites permettent d'observer la cinématique vertébrale des régions allant du garrot jusqu'au bassin, mais restent cependant incapables de détailler les mouvements du segment corporel défini par les premières vertèbres thoraciques, les vertèbres cervicales et la tête.

Rappelons notamment que ce segment comprend la charnière cervico-thoracique qui possède des caractéristiques anatomiques laissant supposer que ces capacités fonctionnelles pourraient être comparables à celles de l'articulation lombo-sacrée.

Ainsi, si les résultats actuels renforcent encore l'idée que le balancier cervico-céphalique joue un rôle essentiel dans la locomotion, ils ne permettent pas encore de valider les hypothèses et les théories posées sur ce sujet et les liens entre la coordination des mouvements de la tête avec le reste de la colonne thoraco-lombaire ne sont pas encore totalement établis.

332. ELECTROMYOGRAPHIE

L'étude de l'activité électromyographique (EMG) des muscles permet de mettre en évidence les périodes de travail musculaire. Ainsi lorsque l'on compare ces résultats aux données cinématiques en fonction du déroulement de la foulée, il devient possible d'analyser de façon objective le rôle des muscles étudiés dans les mouvements articulaires et d'en déduire leur fonction réelle pendant la locomotion.

Pour enregistrer le signal électrique émis par un muscle, deux techniques sont actuellement envisageables ; soit la méthode invasive qui utilise des électrodes intramusculaires soit la méthode non invasive grâce à des électrodes cutanées.

Certains auteurs ont pensé que les échos parasites causés par le voisinage musculaire étaient trop importants avec les électrodes de surface, rendant le signal enregistré non fiable (Jansen et coll. 1992). Mais les résultats obtenus avec les deux méthodes sont de qualité similaire aussi bien au niveau du timing que de l'amplitude des signaux ce qui montre que les échos parasites sont négligeables avec l'EMG de surface (Robert et coll. 1999).

Il est possible d'obtenir des résultats constants et reproductibles chez un même cheval sur différentes sessions, mais pour cela il faut standardiser le protocole

d'enregistrement des données ; utiliser d'un tapis roulant à vitesse constante, réaliser un échauffement identique à chaque fois, positionner les électrodes aux mêmes endroits (Robert et coll. 1999). En effet, il a été montré que l'amplitude du signal est variable en fonction de la vitesse, il s'intensifie lorsqu'elle augmente. Par ailleurs, le placement des électrodes est primordial et les variabilités observées peuvent être en rapport avec une place inexacte. Or, il semble que les électrodes de surface donneraient des résultats plus répétables car on peut plus facilement les replacer aux mêmes endroits (Robert et coll. 1999).

Enfin, pour certains muscles des différences dans le timing sont observées entre les études, elles peuvent être attribuer à la méthode utilisée. En effet, l'EMG de surface enregistre seulement l'activité superficielle du muscle. Or, plusieurs études ont montré pour ces muscles l'existence d'un gradient de fibres de profil métabolique différent allant de la surface vers la profondeur et permettant de décrire deux régions anatomiques distinctes. Ainsi, la partie profonde de ces muscles n'aurait pas exactement les mêmes aptitudes que la partie superficielle et ne serait donc pas active au même moment (Robert et coll. 1999).

3321. RESULTATS

Le schéma de l'activité électromyographique des muscles étudiés varie considérablement d'une allure à l'autre. Certains sont inactifs au pas, d'autres présentent deux périodes d'activité au pas et au trot et une seule au galop (Robert et coll. 1998, Denoix et Audigé 2001b).

Les côtés droit et gauche d'un muscle peuvent avoir soit une action simultanée soit agir comme des antagonistes.

L'amplitude du signal montre parfois des périodes d'activité plus intense pour un même muscle au cours d'une même foulée ce qui laisse supposer que le travail musculaire est alors lui aussi plus intense.

Pour tous les muscles étudiés, l'amplitude des EMG est plus grande au trot qu'au pas, elle augmente aussi avec la vitesse. Au galop, certains muscles montrent une augmentation de l'intensité de leur activité par rapport au trot, les autres gardent une amplitude similaire (Robert et coll. 1998).

Enfin, les études comparatives montrent que la présence d'un cavalier n'influence pas de manière significative le timing des périodes d'activité (Tokuriki et coll. 1989 et Robert et coll. 1998).

33211. ACTIVITE ET PLAN DE COOPERATION MUSCULAIRE AU PAS

Denoix et Audigié 2001b

Jansen et coll. 1992

Robert et coll. 1998

Tokuriki et coll. 1989 et 1999

(Cf. figure n°67)

Le muscle splénius présente deux phases d'activité par foulée, les côtés droit et gauche sont activés simultanément.

Il commence à se contracter pendant la première partie de la phase d'appui des membres antérieurs (fin du deuxième et du quatrième temps) et cesse son activité avant leur levée (fin du premier et du troisième temps).

La tête atteint sa position la plus haute quand il cesse son activité, ainsi il participe activement au relevé de la tête et à l'extension de l'encolure.

Le muscle sterno-céphalique présente deux phases d'activité par foulée qui sont réciproques à celles du muscle splénius.

Il commence sa contraction lors du poser des membres antérieurs (fin du premier et du troisième temps) et cesse son activité pendant la première partie de l'appui juste avant le début d'activité du muscle splénius (fin du deuxième et du quatrième temps).

Il participe donc activement à l'abaissement de la tête.

Le muscle droit de l'abdomen est inactif.

Le muscle longissimus du dos présente aussi deux phases d'activité par foulée.

Son activité commence avant le temps de mi-appui des membres postérieurs (deuxième moitié du premier et du troisième temps) et cesse avant leur levée (à la fin du deuxième et du quatrième temps).

Il est actif pendant la phase de propulsion des membres postérieurs.

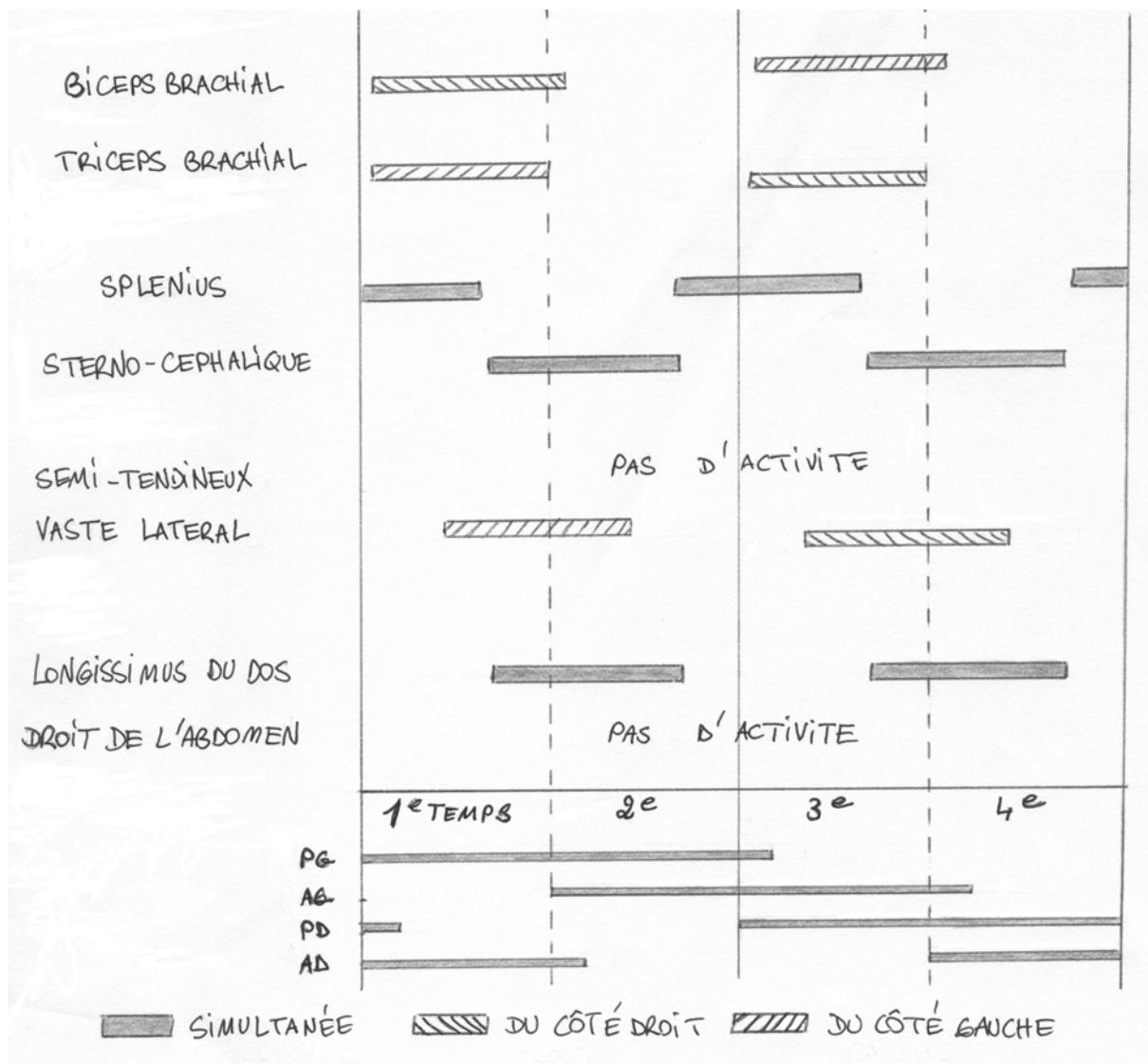


Figure n°67. Principales périodes d'activité électromyographique pendant une foulée de pas de certains muscles du cheval.

(Adapté d'après Denoix et Audigié 2001b, Robert et coll. 1998 et Tokuriki et coll. 1989)

PG=postérieur gauche, AG= antérieur gauche, PD=postérieur droit et AD=antérieur droit.

Les traits représentent les phases d'appui des membres.

Activité EMG des muscles des membres en fonction des phases de la foulée

De même que pour les muscles de la région axiale, l'activité électrique des muscles des membres a aussi été étudiée. Dans l'ensemble les résultats sont assez comparables avec les descriptions fonctionnelles basées sur les déductions des anatomistes.

Le muscle triceps brachial est actif pendant la deuxième moitié du soutien des membres antérieurs, c'est-à-dire pendant la phase de protraction (premier et troisième temps).

Le muscle biceps brachial est actif pendant la deuxième moitié de l'appui du membre antérieur du même côté, c'est-à-dire pendant la phase de propulsion.

Le muscle semi tendineux est inactif.

Le muscle vaste latéral est actif au milieu de la phase d'appui des membres postérieurs (fin du premier et du troisième temps jusqu'à la fin du deuxième et du quatrième temps).

33212. ACTIVITE ET PLAN DE COOPERATION MUSCULAIRE AU TROT

Denoix et Audigié 2001b

Robert et coll. 1998, 1999 et 2001

Tokuriki et coll. 1989

(Cf. figure n°68)

Le muscle splénius présente deux phases d'activité identiques par foulée, soit une à chaque temps. Les côtés droit et gauche sont activés simultanément. Il est actif du poser jusqu'au début de la phase de propulsion des bipèdes diagonaux (première et deuxième phases de chaque temps). Contrairement au pas, il participe ici à limiter l'abaissement de la tête.

Le muscle sterno-céphalique présente deux phases d'activité identiques par foulée, soit une à chaque temps. Les côtés droit et gauche sont activés simultanément. Il est actif à chaque temps de suspension. Il contrôle l'élévation de l'encolure.

Le muscle brachio-céphalique présente deux phases d'activité symétriques par rapport au plan médian par foulée, soit une à chaque temps. Le côté droit et le côté gauche ne se contractent donc pas en même temps et présentent deux périodes d'intensité différentes. Une période de forte intensité commence du côté du diagonal à l'appui lorsque ce dernier est en fin de propulsion, elle est suivie par une période de faible activité allant de la fin du temps de suspension jusqu'à la fin de l'appui du diagonal opposé. Il agit donc activement sur la protraction les membres antérieurs.

Le muscle Longissimus du dos présente deux phases d'activité identiques par foulée, soit une à chaque temps. Il se contracte bilatéralement en fin de propulsion avant la levée des bipèdes diagonaux (fin de la troisième phase) et pendant le temps de suspension. La colonne vertébrale thraco-lombaire réalise alors une flexion. Ainsi il participe d'avantage à la limitation de la flexion thoraco-lombaire qu'à la réalisation de l'extension.

Le muscle droit de l'abdomen présente deux phases d'activité identiques par foulée, soit une à chaque temps. Les côtés droit et gauche sont activés simultanément. Il est actif au moment du poser des bipèdes diagonaux et au début de la propulsion (première et deuxième phases de chaque temps). Il limite donc l'extension passive de la colonne thoraco-lombaire induite par l'accélération de la masse viscérale abdominale.

Le muscle multifide des lombes présente une activité réciproque à celle du muscle droit de l'abdomen. Ils sont actifs de la fin de la phase de propulsion des bipèdes diagonaux jusqu'au milieu du temps de suspension. Ainsi il peut limiter les mouvements vertébraux et notamment ceux de latéro-flexion.

Activité EMG des muscles des membres en fonction des phases de la foulée

De même que pour les muscles des membres antérieurs les résultats sont assez comparables avec les descriptions fonctionnelles basées sur les déductions des anatomistes. Cependant, une part importante de l'activité de certains de ces muscles est observée lors de contractions excentriques, ce qui souligne là encore la participation des muscles dans la stabilisation du corps durant la locomotion au trot.

Le muscle fessier moyen est actif de la fin de la phase de suspension et la première partie de l'appui. Il participe donc à l'extension de la hanche mais il est aussi stabilisateur pendant la locomotion en empêchant l'écroulement lorsque le membre postérieur touche le sol.

Le muscle tenseur du fascia lata montre deux phases d'activité identiques par foulée avec deux périodes d'intensité différente. Il se contracte à partir du mi-appui jusqu'à moitié du temps de suspension ; l'intensité de sa contraction est plus intense pendant l'appui.

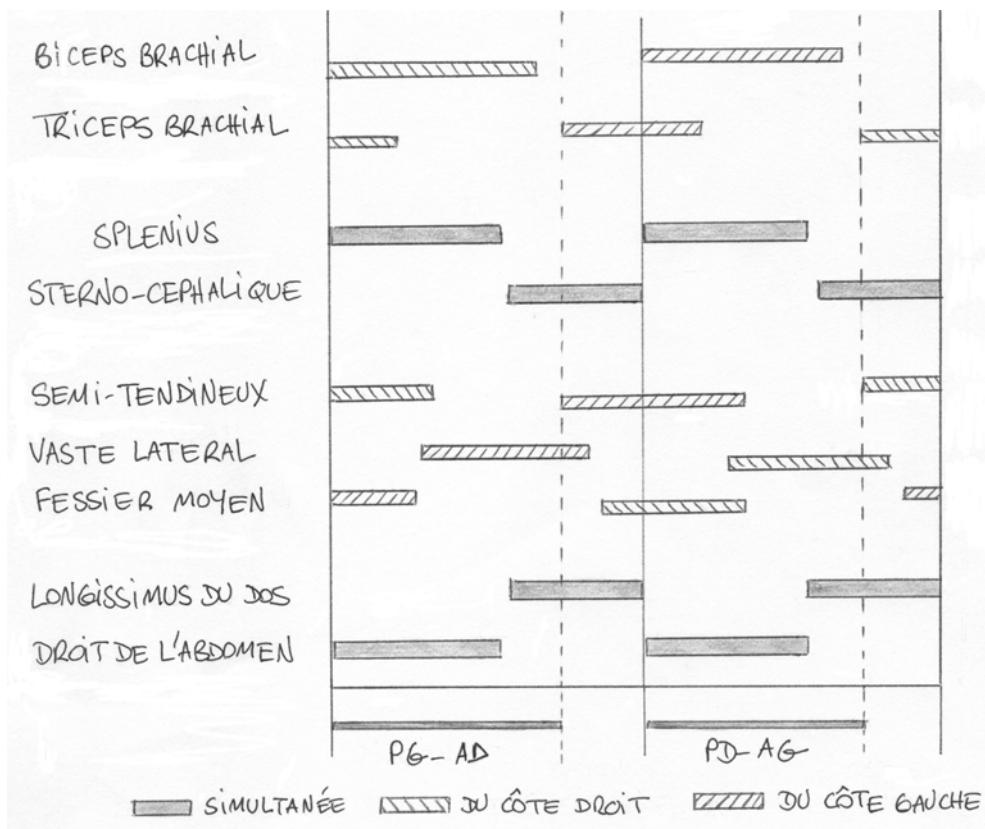


Figure n°68. Principales périodes d'activité électromyographique pendant une foulée de trot de certains muscles du cheval.

(Adapté d'après Denoix et Audigié 2001b, Robert et coll. 1999 et Tokuriki et coll. 1989)

PG-AD=bipède diagonal droit, PD-AG=bipède diagonal gauche.

Les traits représentent les phases d'appui des bipèdes diagonaux.

Le muscle vaste latéral est actif principalement pendant la seconde moitié de l'appui. On retrouve la même activité chez l'ensemble des muscles quadriceps fémoraux. Ce groupe musculaire joue donc un rôle dans l'extension du grasset et en prévient la flexion, ils sont considérés comme les acteurs les plus importants dans le verrouillage de cette articulation.

Le muscle biceps fémoral montre une période d'activité principale pendant le temps de suspension. De même que pour les quadriceps fémoraux, cet extenseur de la hanche joue aussi un rôle dans la stabilisation du grasset en limitant sa flexion.

Le muscle semi-tendineux est actif pendant le temps de suspension où il est fléchisseur du grasset et pendant la première partie de l'appui où il participe à l'extension de la hanche.

Le muscle biceps brachial est actif lors de l'appui du membre antérieur du même côté.

Le muscle triceps brachial est actif pendant le temps de suspension et la première moitié de l'appui du membre antérieur du même côté.

33213. ACTIVITE ET PLAN DE COOPERATION MUSCULAIRE AU GALOP

Denoix et Audigié 2001b

Robert et coll. 1998

Le muscle splénius présente une seule phase d'activité par foulée. Les côtés droit et gauche sont activés simultanément.

Il est actif pendant la phase d'appui du bipède diagonal poursuivant.

Il limite l'abaissement de la tête et provoque son extension pendant l'appui du postérieur meneur et la phase de suspension.

Le muscle brachio-céphalique il est actif du côté du membre antérieur meneur pendant la phase d'appui de ce dernier et il présente une période de forte intensité du côté opposé pendant le temps de suspension. Ces périodes d'activité dissociées sont en relation avec l'allure dissymétrique et les périodes de protraction de chaque antérieur.

Le muscle sterno-céphalique présente une seule période d'activité par foulée qui est réciproque à celle du muscle splénius. Les côtés droit et gauche sont activés simultanément.

Il est actif de la fin de la phase de propulsion du membre antérieur meneur jusqu'à la première moitié de l'appui du membre postérieur poursuivant (fin du troisième temps, temps de suspension et début du premier temps).

Le muscle longissimus du dos présente une seule phase d'activité par foulée avec deux périodes d'intensité différente. Les côtés droit et gauche sont activés simultanément.

Il est actif de la fin de propulsion du membre antérieur meneur jusqu'à la fin de l'appui du membre postérieur poursuivant, il présente une période de plus forte intensité pendant le temps de suspension et la phase d'amortissement du membre antérieur.

Muscle droit de l'abdomen présente une seule phase d'activité par foulée qui est réciproque à celle du muscle longissimus du dos.

Il est actif pendant la phase d'appui du bipède diagonal poursuivant.



Le muscle multifide lombaire est actif pendant la phase de soutien du postérieur poursuivant.

3322. APPORTS ET LIMITES DE L'ELECTROMYOGRAPHIE POUR L'ANALYSE DE LA BIOMECANIQUE DE LA REGION AXIALE.

Au pas, l'activité des muscles splénius et streno-céphalique est en accord avec l'hypothèse d'un balancier cervico-céphalique jouant un rôle prépondérant dans cette allure. Quant à l'activité des muscles droit de l'abdomen et longissimus du dos, elle peut être en rapport avec le fait que le pas n'est pas une allure sautée et par conséquent les forces dues à l'accélération de la pesanteur sont peu importantes.

En effet au trot, le muscle droit de l'abdomen et les muscles extenseurs de la hanche (biceps fémoral et fessier moyen) sont actifs au moment du poser des bipèdes diagonaux alors que le dos est en extension. Ils pourraient donc en partie limiter l'extension thoraco-lombaire et lombo-sacrale induite par l'accélération de la masse viscérale (Faber et coll. 2001a, Robert et coll. 2001). De plus, pendant la deuxième partie de l'appui, la flexion dorsale n'est pas induite par le muscle droit de l'abdomen qui alors est inactif, de même l'extension dorsale observée pendant la première partie de l'appui n'est pas induite par le muscle longissimus dorsi (Audigié et coll. 1999, Faber et coll. 2001a). En effet, le muscle longissimus dorsi n'est actif qu'en fin de propulsion avant la levée des bipèdes diagonaux alors que la colonne thoraco-lombaire est en flexion. Ainsi, en plus d'induire l'extension lombo-sacrale et de faciliter la propulsion des postérieurs, il pourrait aussi stabiliser la colonne thoraco-lombaire dans son mouvement de flexion. De plus, dans une étude sur tapis roulant il a été montré que lorsque la vitesse du trot augmente, l'amplitude de flexion de la colonne thoraco-lombaire diminue tandis que l'activité musculaire dorsale s'intensifie (Robert et coll. 2001). Il est donc probable qu'au trot, l'activité musculaire dorsale soit principalement en relation avec une fonction stabilisatrice venant s'opposer aux forces d'inertie de l'abdomen. Cette hypothèse est en accord avec la théorie selon laquelle lorsque la vitesse augmente l'activité musculaire s'intensifie afin d'augmenter la rigidité du dos et permettre une transmission plus efficace des forces propulsives générées par les membres (Rooney 1982). Par ailleurs, elle est aussi cohérente avec les données récoltées sur les plateaux de forces. En effet, la colonne thoraco-lombaire atteint un maximum d'extension lors du mi appui des bipèdes diagonaux, ce qui correspond à la force maximale verticale de réaction du sol, c'est à dire la fin de la phase de chargement des

membres. Au contraire, la flexion du dos se produit pendant la seconde partie de l'appui ce qui correspond à une phase de diminution de la force verticale de réaction du sol (Merkens et coll. 1993a).

[Cf. 2^{ième} partie, § 333]

De plus, cette rigidification de la colonne thoraco-lombaire par une intensification de l'activité musculaire entraîne aussi une restriction des mouvements latéraux, qui est de fait plus importante au trot par rapport au pas (Robert et coll. 1998). Cette observation peut s'expliquer par une régulation de l'équilibration différente pour de ces deux allures. En effet, au pas, l'alternance de phases d'appui bipédale et tripédale demanderait d'importants déplacements du centre de gravité du corps afin de conserver l'équilibre, ces phénomènes pouvant être en partie contrôlés par les mouvements de latéro-flexion et de rotation axiale (Faber et coll. 2001a). De plus, au trot la latéro-flexion de la colonne thoraco-lombaire est initiée lors des phases de protraction alors que le muscle longissimus dorsi est actif. Ce dernier pourrait donc aussi résister aux forces latérales induites par les membres postérieurs (Faber et coll. 2001a).

Enfin, des enregistrements électromyographiques ont été réalisés sur le muscle splénius au trot alors que l'encolure était maintenue en position basse par un enrênement. Ils ont montré que l'activité de ce muscle était alors moins intense ce qui peut s'expliquer par une plus grande participation des tensions passives exercées par le ligament nuchal lorsque la tête est en position basse (Denoix et Audigé 2001b). Par ailleurs, cette observation est en accord avec l'hypothèse d'un stockage d'énergie dans les fibres élastiques du ligament nuchal permettant de réduire la puissance du travail musculaire (Gellman et Bertram 2002a).

Ainsi au trot et au galop, le rôle des muscles de la région axiale serait de limiter les mouvements de la colonne vertébrale plutôt que de les induire (Audigé et coll. 1999, Faber et coll. 2001a, Denoix et Audigé 2001b)

Au pas, les données électromyographiques sont insuffisantes pour supporter cette hypothèse (Faber et coll. 2000).

La principale limite de l'électromyographie pour l'analyse de la biomécanique de la région axiale est le nombre limité de muscles accessibles. Notamment, des enregistrements sur les muscles de la région lombo-iliaque (psoas) et les muscles fémoraux médiaux (adducteurs de la cuisse) ainsi que certains muscles profonds de l'encolure (long du cou) ne sont à l'heure actuelle pas envisageables mais n'en sont pas moins nécessaires pour compléter l'analyse.

333. PLATEAUX DE FORCES

Les plateaux de forces appliqués à la locomotion des équidés permettent d'évaluer les forces de réactions du sol.

A l'heure actuelle, les données concernant les trois allures naturelles chez des sujets sains sont disponibles (Merkens et coll. 1985, 1993a et b).

[Cf. 2^{ième} partie, § 155, 156, 166] (Cf. figure n°70)

De façon schématique, nous retiendrons simplement que la force de réaction verticale du sol est :

- ⇒ Croissante pendant la phase d'amortissement ; on parle alors parfois de phase de chargement.
- ⇒ Maximum à mi appui ; elle est alors représentative de la force impulsive (ou impulsion linéaire) mise en jeu à l'extrémité distale du membre.
- ⇒ Décroissante lors de la phase de propulsion ; on évoque alors parfois la phase de relargage de l'énergie emmagasinée.

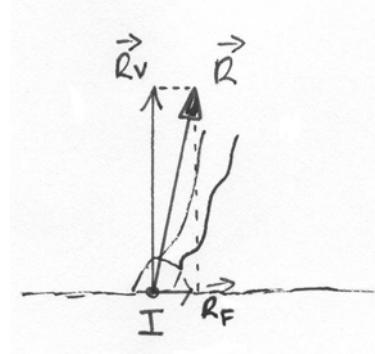


Figure n°70. La force de réaction du sol.

La force de réaction du sol est appliquée au centre des pressions I. R_v est sa composante verticale (ou force de réaction verticale) et R_f sa composante de frottements.

(adapté d'après Bouisset 2002, Merkens et coll. 1993)

Nous avons déjà vu que ces résultats, couplés aux données cinématiques et cinétiques, sont la base de l'analyse dynamique inversée qui permet d'évaluer les

forces et les moments appliquées aux articulations en remontant de proche en proche de la plus distale vers la plus caudale.

Cependant, le mouvement du centre de rotation d'une articulation est directement relié à la combinaison des forces musculaires agissant dessus. Or les membres utilisent fréquemment un mécanisme de chaîne fermée et redistribuent ces moments articulaires sans aucun changement visuel dans la posture et l'allure. Ainsi, pour pouvoir évaluer le moment articulaire agissant au niveau des articulations caudales pendant la locomotion, un plan de coopération musculaire précis est nécessaire.

L'enregistrement électromyographique est le moyen objectif de connaître l'activité d'un muscle, or nous avons vu que ces mesures ne sont pas réalisables sur l'ensemble de l'appareil musculaire. Par conséquent, l'analyse dynamique des articulations sacro-iliaques et de l'épaule ne peut donc qu'être estimée de manière incertaine.

Cependant, comme nous l'avons vu dans les discussions autour des résultats expérimentaux déjà traités, la confrontation de ces données avec la cinématique vertébrale et l'activité électromyographique, permettent d'établir des hypothèses de plus en plus précises et sûrement proches de la réalité.

Mais l'essentiel reste souvent noyé sous une masse de données.

34. SYNTHESE DE L'ANALYSE BIOMECANIQUE DE LA REGION AXIALE

L'analyse biomécanique de la région axiale ne peut se réaliser qu'à partir d'une analyse dynamique inversée puisque les forces appliquées à ce niveau sont inconnues.

Malgré les progrès technologiques et notamment la progression des connaissances sur la cinématique de la région axiale, les données sont encore insuffisantes pour réaliser une analyse complète. Les principales limites rencontrées à l'heure actuelle sont d'une part l'impossibilité de récolter des données cinématiques de la charnière cervico-thoracique et d'autre part les difficultés à réaliser des enregistrements électromyographiques de certains muscles.

En effet, le mouvement du centre de rotation d'une articulation est directement relié à la combinaison des forces musculaires agissant dessus. Or les membres utilisent fréquemment un mécanisme de chaîne fermée et redistribuent ces moments articulaires sans aucun changement visuel dans la posture et l'allure. Ainsi, l'établissement de plans de coopération musculaires plus détaillés devrait déjà permettre une nette progression de l'analyse.

Cependant, la confrontation et la comparaison de tous les résultats actuels permettent de réaliser des hypothèses de plus en plus précises et ainsi de proposer des mécanismes locomoteur sûrement de plus en plus proche de la réalité.

Ainsi, devant la grande quantité de données expérimentales actuellement disponible, une orientation des recherches notamment au travers de l'expérience des cavaliers peut être une approche intéressante pour l'avenir.

TROISIEME PARTIE : ACTION DU
CAVALIER SUR LE DOS DE SON CHEVAL,
APPLICATION DANS LES PRINCIPES
L'ART EQUESTRE.

Les cavaliers et leurs maîtres tentent depuis longtemps d'expliquer et d'analyser leur action sur la mécanique de leur monture. Dans ce but ils ont largement fait appel au savoir dans les domaines de l'anatomie descriptive et fonctionnelle, notamment transmis par l'enseignement vétérinaire.

Comme nous venons de le voir, l'état actuel des connaissances concernant la biomécanique de la région axiale des équidés ne permet pas de décrire et encore moins d'analyser avec certitude l'action mécanique générale du cavalier sur le dos de son cheval. Ainsi, malgré la progression des connaissances réalisée ces dernières années dans ce domaine, le nombre encore important de données indisponibles fait qu'une telle analyse ne peut aboutir qu'à la formulation d'hypothèses et de théories.

Cependant, l'enseignement des grands principes de l'art équestre peut s'avérer être une source importante d'informations complémentaires, trop souvent négligée par les scientifiques. En effet, la terminologie équestre sur laquelle est fondé l'enseignement de la pratique de l'équitation semble au départ peu explicite. Pourtant ses termes correspondent à des réalités de la locomotion imagée par l'approche visuelle de l'instructeur et les sensations du cavalier.

L'objectif de cette partie est donc dans un premier temps d'exposer aux néophytes les bases de ces principes et dans un deuxième temps de les confronter aux données acquises et aux théories de la biomécanique. Pour cela, nous allons donc tenter d'expliquer la mécanique de base de ce que l'on appelle en terme équestre la « mise sur la main » et de montrer que l'approche du cavalier est compatible avec les résultats des études biomécaniques les plus récentes.

A la lumière de cette étude nous espérons faire évoluer l'intérêt du scientifique pour la compréhension de l'approche sensorielle du cavalier, afin d'orienter de façon plus efficace sa réflexion et ses recherches et à terme aboutir à une approche plus cohérente du cheval athlète lui permettant de s'investir davantage dans la carrière sportive de ces derniers.

N.B. Les références équestres traitées dans cette partie ont été volontairement limitées, afin de rendre l'étude plus abordable pour le néophyte et surtout de conserver le caractère commun à toute une population de cavaliers des sensations qui y sont analysées. Ainsi, les définitions et les principes exposés sont exclusivement basés sur l'approche proposée dans les manuels officiels de préparation des examens fédéraux. (*Manuel officiel de préparation aux examens fédéraux d'équitation. Tome 2. les examens d'argent*. Edition Lavauzelle, 1988. *Manuel officiel de préparation aux brevets fédéraux. Etre cavalier galops 5, 6 et 7*. Edition Lavauzelle, 1995)

1. LES PRINCIPES DE L'ART EQUESTRE

Le premier principe qui n'est pas souvent mis en avant dans une discipline où l'on prétend rechercher l'harmonie du couple cheval-cavalier est celui d'un **animal soumis à la volonté de l'homme**. La notion de **relation de dominant/dominé** n'en est pas moins omniprésente et ne doit pas être considérée sous un angle péjoratif. En effet, un cavalier soucieux de respecter sa monture doit rechercher en premier lieu une **attitude juste** permettant l'exécution d'un **travail physique dans un confort optimal**. C'est uniquement par cette démarche que le couple accèdera secondairement à un état de réelle **grâce et d'harmonie**.

Cependant, il peut être important de garder à l'esprit cette notion de relation de dominant/dominé, afin de mieux saisir tout le sens de certains termes tels que le fonctionnement dans le bon sens, l'équilibre, les cessions, les résistances ...

11. LES GRANDES DEFINITIONS

La maîtrise harmonieuse d'un cheval nécessite la réunion simultanée de trois points fondamentaux ; **l'équilibre, l'impulsion et la direction**.

Dans ce but, le cavalier recherche une certaine attitude de la part de sa monture on parle classiquement et abusivement de « mise sur la main ». Cette attitude n'est pas innée chez le jeune cheval et s'obtient avec le travail, de même nous allons voir qu'elle comprend aussi divers degrés allant d'une attitude quasi naturelle proche de l'horizontale jusqu'au rassembler lorsque le niveau de dressage est élevé.

111. L'EQUILIBRE

L'équilibre est une des notions équestres les plus difficiles à définir et à appréhender.

Sur le plan mécanique, l'état d'équilibre d'un corps est défini par l'application de la deuxième loi de Newton et le théorème du moment cinétique. Il est caractérisé par le fait que la résultante et le moment résultant des forces extérieures sont nuls.

[Cf deuxième partie, § 15 - relations (4) et (5')]

Cavaliers et scientifiques ont largement utilisé ces principes mécaniques pour tenter d'expliquer cette notion. Mais comme nous l'avons déjà vu, l'étude d'un système articulé en mouvement peut s'avérer extrêmement complexe notamment quand on l'applique au vivant. Ainsi, il existe à l'heure actuelle, un certain nombre de théories basées en partie sur la position du centre de gravité et sur la taille du polygone de sustentation qui donnent une approche plus ou moins réaliste de la notion d'équilibre du couple cavalier - cheval.

Heureusement dans la pratique un cavalier ne se soucie guère de la position du centre de gravité du couple pour évaluer l'équilibre de sa monture. En effet, pour lui cette notion est avant tout basée sur le ressenti. **Un cavalier considère que son cheval est en équilibre quand il obtient cette sensation de légèreté qui naît de l'absence de résistance entre les deux parties.**

L'équilibre d'un cheval s'évalue principalement dans deux plans : on peut alors parler d'**équilibre longitudinal** et d'**équilibre latéral**.

1111. L'EQUILIBRE LONGITUDINAL

L'équilibre longitudinal est défini par la répartition des masses entre l'avant main et l'arrière main. (Cf. figure n°71)

Chez le jeune cheval en début de dressage, on observe une tendance plus ou moins marquée en fonction de la conformation à répartir d'avantage de poids sur les antérieurs que sur les postérieurs. Or, **un cheval qui reporte son poids sur son avant main aura d'une part tendance à figer son bloc d'épaules et son encolure et d'autre part à s'appuyer d'avantage sur la main de son cavalier.** Par conséquent, une telle attitude est de nature à **créer des résistances**.

L'allègement de l'avant main par le report du poids sur l'arrière main permet donc au cavalier d'avoir un contact léger avec la bouche et de mobiliser avec aisance l'avant main de sa monture.

Cette attitude n'est cependant pas naturelle pour le cheval monté. Elle s'obtient à force de travail, par le développement simultanément de **l'engagement des postérieurs, de la tonicité musculaire et de la position du balancier cervico-céphalique**.

Plusieurs orientations sont alors possibles en fonction du niveau de dressage allant d'un équilibre horizontal vers un équilibre sur les hanches jusqu'au rassembler. **L'équilibre juste dépend évidemment de la situation, il doit être adapté aux mouvements à réaliser.**



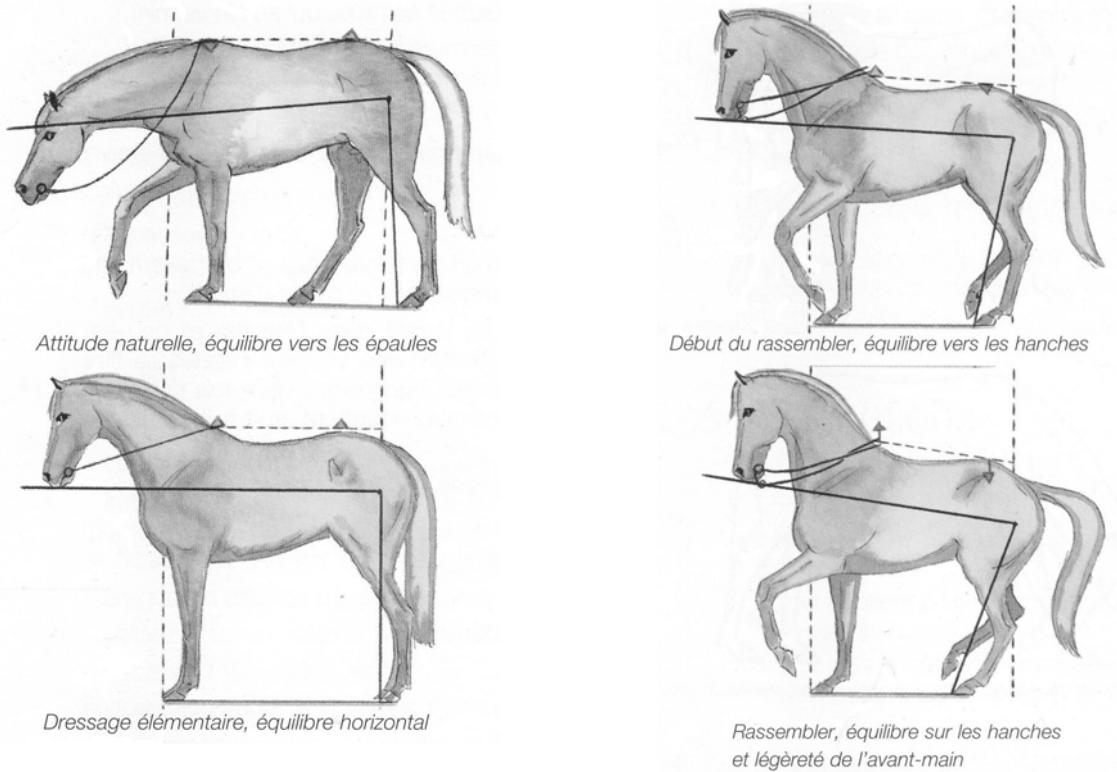


Figure n°71. L'équilibre longitudinal

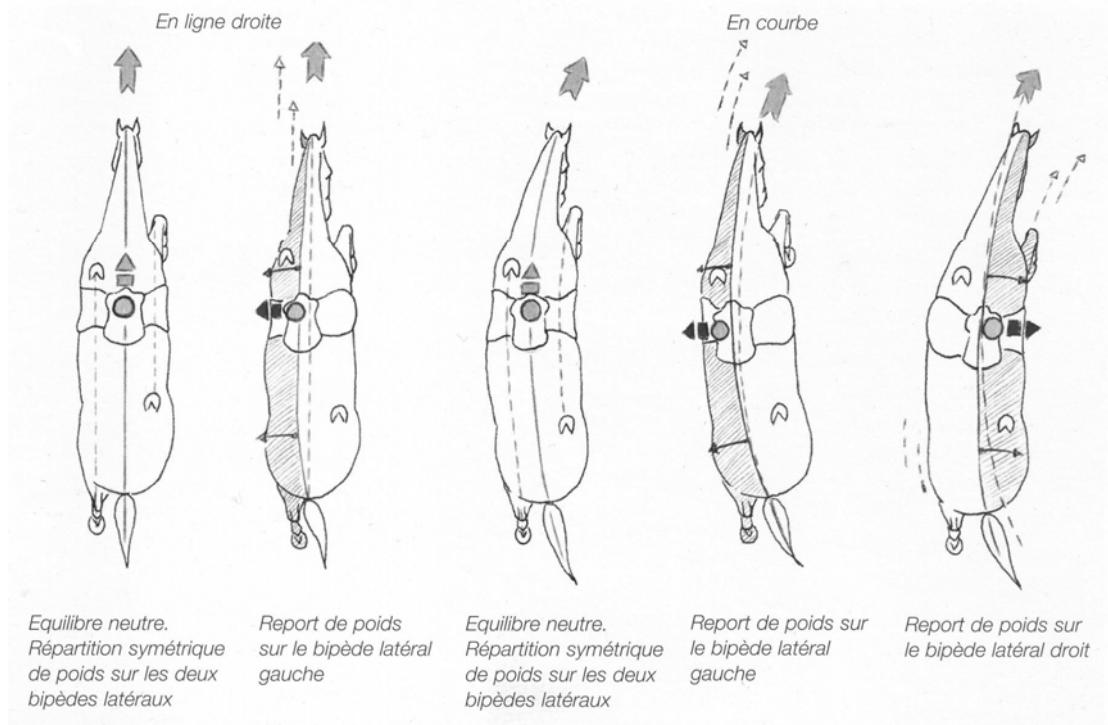


Figure n°72. L'équilibre latéral.

(Manuel officiel de préparation aux brevets fédéraux. *Etre cavalier galops 5, 6 et 7*. Edition Lavauzelle, 1995.)

1112. L'EQUILIBRE LATÉRAL

L'équilibre latéral est défini par la répartition des masses entre le bipède latéral droit et le bipède latéral gauche du cheval. (Cf. figure n°72)

En effet, en ligne droite comme dans une courbe le cavalier peut ressentir une **asymétrie dans les contacts** qu'il établit avec sa monture et qui sont à l'origine de **résistances plus prononcées d'un côté que de l'autre** de la part de sa monture.

Les sensations du cheval qui « tombe ou qui penche » ou encore qui « tire » d'un côté sont deux exemples fréquemment rapportés par les cavaliers.

112. L'IMPULSION

Classiquement l'impulsion se définit comme « le désir permanent du cheval naturel ou acquis par le dressage, de se porter en avant ».

Elle se caractérise par la sensation d'énergie qui se dégage du cheval qui évolue. C'est donc la qualité qui permet d'avancer de manière énergique, on emploiera de même les termes d'**activité** et de **tonicité**.

Elle se caractérise d'une part par l'**engagement des membres postérieurs** et d'autre part par l'énergie de leur **détente** que l'on nomme encore la **poussée des postérieurs**. (Cf. figure n°73)

La vitesse n'est pas un critère d'impulsion.

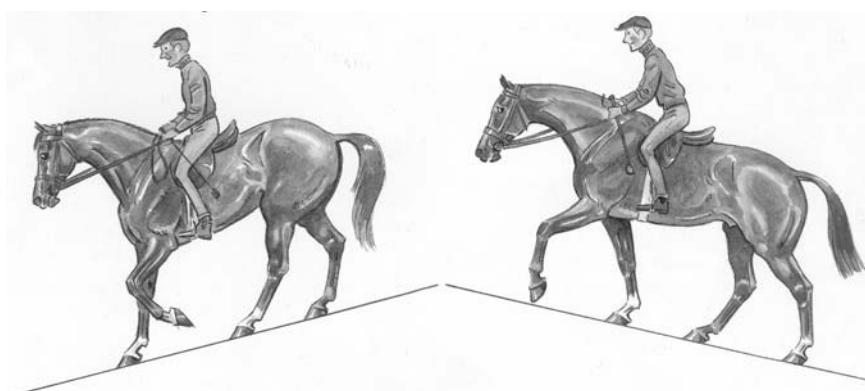


Figure n°73. Engagement et poussée « naturels » des membres postérieurs.
En descente, engagement des postérieurs.

En montée, poussée des postérieurs et tension de la ligne du dessus.

(Manuel officiel de préparation aux examens fédéraux d'équitation. Tome 2. *les examens d'argent*. Edition Lavauzelle, 1988.)

Ainsi, en équitation on décrit classiquement que le moteur du cheval se trouve dans l'arrière-main et résulte à la fois de l'activité des hanches et des forces musculaires des membres postérieurs.

113. LA DIRECTION

En principe, le cavalier doit maîtriser l'évolution de son cheval dans l'espace et adapter sa locomotion. Autrement dit, il impose l'allure et la vitesse du déplacement et dirige la trajectoire et l'attitude de sa monture. Dans un des cas les plus simples le cavalier demande à son cheval de tourner à droite ou à gauche à partir d'un déplacement en ligne droite. Pour cela, il va incurver sa monture et lui imposer une allure et une vitesse qui doivent être compatibles avec la trajectoire envisagée.

De même, le cavalier peut imposer à sa monture des attitudes variées au travers différents exercices et figures de dressage, ou encore aller franchir des obstacles.

Il est important de comprendre que l'harmonie pour le couple ne sera atteinte même pour une action simple que s'il est en équilibre avec l'impulsion nécessaire ; c'est la base du principe de la mise sur la main.

114. LA MISE SUR LA MAIN

L'expression mettre un cheval sur la main laisse faussement penser que l'on travaille uniquement sur l'avant main.

Pourtant elle s'applique en réalité une attitude globale du cheval qui doit fonctionner « dans le bon sens », c'est-à-dire dans l'équilibre et l'impulsion après avoir cédé à l'ensemble des aides du cavalier. Ainsi cette attitude comprend : une « tension de la ligne du dessus » caractérisée par l'**engagement des postérieurs, la montée de la base du garrot et enfin la bascule de la nuque et la cession à la main avec la fermeture de l'angle tête-encolure**.

1141. LE PLACER DE L'ENCOLURE - NOTION DE CESSION A LA MAIN.

Par définition on dit qu'un cheval a cédé à la main quand il accepte d'établir un contact léger, moelleux et permanent entre sa bouche et les mains de son

cavalier. Ce contact doit être obtenu par la tension des rênes par le cheval sous l'effet de l'impulsion.

On parle aussi parfois abusivement de **placer d'encolure**. Ce terme caractérise une attitude où la tête est fixe, l'encolure plus ou moins arrondie et soutenue sans raideur, la nuque étant toujours le point le plus haut et le chanfrein en avant de la verticale. (Cf. figure n°74)

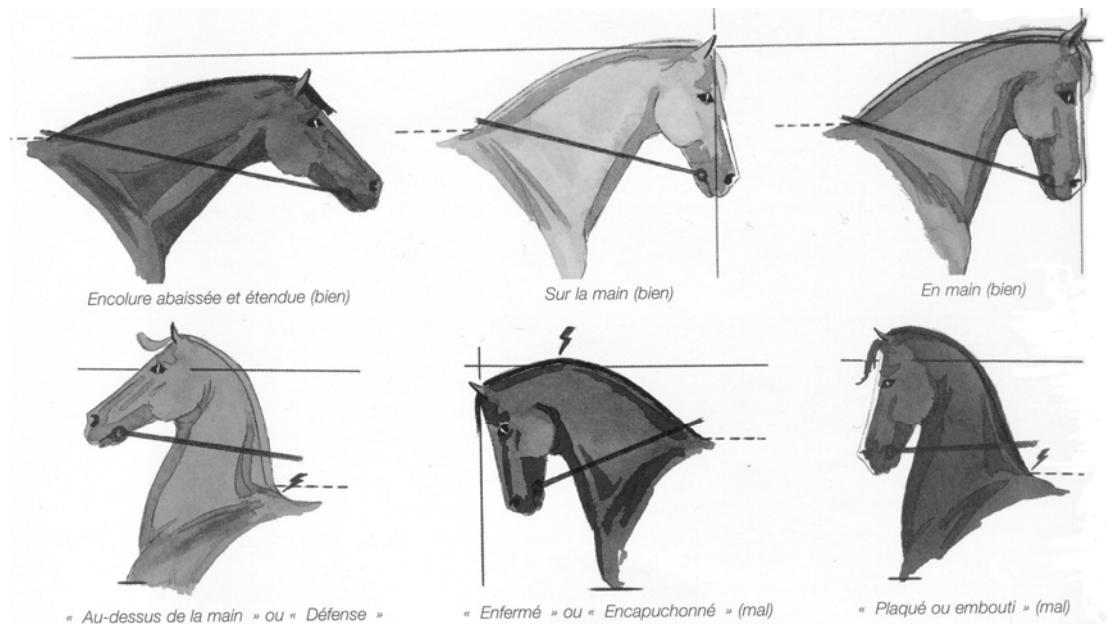


Figure n°74. Les différentes attitudes d'encolures (ou placer).

En haut, les bonnes attitudes allant de gauche à droite d'un niveau de dressage élémentaire à élevé. En bas les mauvaises attitudes, respectivement de gauche à droite, au dessus, en dedans et en retrait de la main.

(Manuel officiel de préparation aux brevets fédéraux. *Etre cavalier galops 5, 6 et 7*. Edition Lavauzelle, 1995.)

Le placer d'encolure est évidemment variable en fonction de la conformation du cheval et surtout de son degré de dressage ; plus le niveau est élevé et plus la fermeture de l'angle tête-encolure pourra être prononcée.

Pour certains, le placer d'encolure est comme un aboutissement visible de la maîtrise d'un cheval. Or il est possible d'obtenir une telle attitude de manière que l'on pourrait qualifier d'artificielle par des embouchures et des enrênements qui facilitent la bascule de la nuque ce qui arrondit l'encolure et verticalise le chanfrein.

Or l'attitude de l'encolure doit toujours être accompagnée d'une cession à la main, conséquence de l'impulsion du cheval et non d'une action de main du cavalier.

Il s'agit là d'un principe fondamental trop souvent négligé qui considère qu'il y a une continuité entre l'arrière main et l'avant main. Ainsi, c'est en réalité sous l'effet de l'impulsion des membres postérieurs puis par des relais musculo-tendineux thoraco-lombaire et de la région cervicale dorsale que l'encolure doit s'arrondir simultanément avec la montée du garrot, et permettre à la nuque de s'avancer au dessus de la bouche.

Ceci implique une nouvelle notion, celle du **cheval tendu**.

1142. LA TENSION - NOTION DE CHEVAL TENDU.

La tension se définit à la fois comme une **qualité physique et morale** du cheval. En effet, elle est le résultat d'une bonne transmission de l'impulsion fournie par l'arrière main vers l'avant main mais aussi d'une permanence du contact obtenue par la soumission et l'obéissance aux aides.

Ainsi, on dit que cette tension naît de l'impulsion générée par la poussée des postérieurs, puis qu'elle est transmise par la ligne du dessus, c'est à dire le dos et l'encolure pour finalement être récupérée par les mains du cavalier.

12. LES AIDES

Les aides sont les **moyens de communication** dont le cavalier dispose pour établir un dialogue avec sa monture. Elles lui permettent d'une part de **transmettre au cheval sa volonté** et d'autre part de **sentir comment sont interprétés ses ordres**.

On peut les classer en trois catégories :

- ⇒ **Les aides naturelles** : le poids du corps par l'intermédiaire de l'assiette, des jambes, des mains et de la voix.
- ⇒ **Les aides artificielles** : les éperons, la cravache et la chambrière.
- ⇒ **Les aides complémentaires** : les enrêlements.

Nous aborderons dans la suite de ce travail uniquement les aides naturelles.

En début d'apprentissage une vision simplifiée des aides oppose l'action des jambes à celle des mains en les considérant respectivement comme « moteur et frein ». Nous allons voir par la suite que très vite dans la pratique leurs actions sont en réalité beaucoup plus subtiles et nuancées. En fait, une aide n'agit jamais seule. La communication avec le cheval résulte en permanence de l'action simultanée de l'ensemble des aides ; c'est ce que l'on appelle l'**accord des aides**.

121. LA POSITION DU CAVALIER - NOTION D'ASSIETTE.

Le cavalier doit acquérir une position qui lui permette de réunir deux qualités fondamentales qui sont la **stabilité et l'indépendance des aides**.

La stabilité se traduit par une absence de mouvements inutiles et involontaires qui peuvent interférer avec les actions du cavalier et à terme gêner l'évolution du cheval.

Pour cela il doit pouvoir **conserver son équilibre** en toutes circonstances, grâce à ce que l'on appelle **l'assiette**.

Dans ce but on décrit classiquement une position idéale où on l'observe **l'alignement à la verticale des épaules, du bassin et des chevilles**. Le dos est donc droit, le bassin proche de la position naturelle de l'homme debout, les cuisses placées à plat descendant librement et la face interne des mollets est au contact du cheval. (Cf. figure n°75)

En plus de cette attitude le cavalier doit aussi veiller à conserver **le liant de ces articulations** autrement dit la souplesse qui lui permettra d'absorber les secousses dues aux déplacements et de rendre ses mains et ses jambes indépendantes les unes des autres. **L'assiette correspond donc à cette faculté du cavalier à conserver sa position avec souplesse et aisance dans toutes les circonstances.**

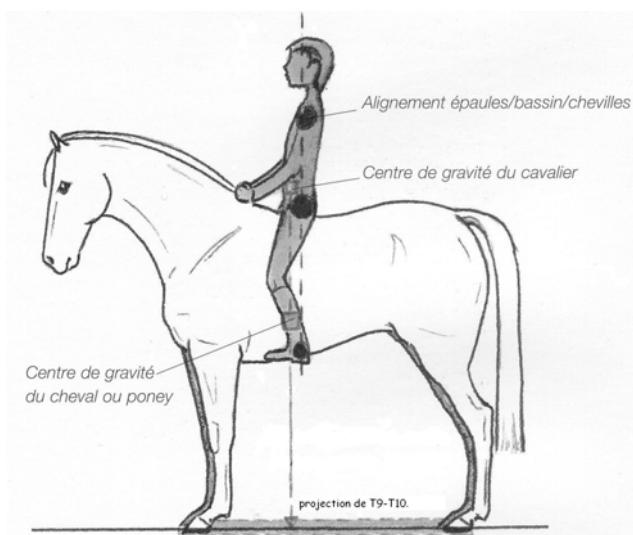


Figure n°75. La position du cavalier en équilibre assis - attitude classique en dressage.

(Manuel officiel de préparation aux brevets fédéraux. Etre cavalier galops 5, 6 et 7. Edition Lavauzelle, 1995.)

Le bassin joue pour cela un rôle principal. En effet, c'est en grande partie grâce à des **mouvements adaptés de son bassin** que le cavalier peut conserver en permanence cette attitude lorsque que sa monture est en mouvement.

Cependant une assiette imperturbable n'est pas innée pour le cavalier. C'est à force de travail sur l'équilibre assis que l'attitude à cheval peut se modifier pour se rapprocher de la verticalité par le redressement du buste, la descente des jambes et un bassin toujours en phase avec le mouvement.

122. LE POIDS DU CORPS - L'ASSIETTE

Comme nous venons de le voir, l'assiette est la qualité qui permet au cavalier de rester en équilibre en toutes circonstances, mais c'est aussi une aide par l'intermédiaire de laquelle le cavalier fait intervenir le poids de son corps.

Grâce à cette aide, il peut obtenir des changements d'attitude ou des variations d'allures par une simple surcharge ou un allègement provoqué par une ou deux fesses. **Cependant, l'assiette ne doit pas être déplacée et il ne faut jamais précéder le cheval, mais plutôt l'accompagner une fois que le mouvement est amorcé.**

- ⇒ Un report de l'ensemble du poids du corps vers l'avant ou vers l'arrière influence la propulsion et/ou l'équilibre du cheval (notamment pour régler l'allure et effectuer des transitions).
- ⇒ Un report du poids du corps d'un seul côté du cheval renforce une indication ou s'oppose à un mouvement (notamment dans le travail de l'incurvation et les déplacements latéraux).

L'axe moyen d'action du poids du corps passe au niveau de la neuvième et de la dixième vertèbre thoracique (Delavenna 2003, Thuilliez 2003).

123. LES JAMBES

Cette aide commence au bassin et se termine au talon. Elles peuvent agir, résister ou céder :

- ⇒ elles agissent par de brèves pressions du mollet.
- ⇒ elles résistent par une pression constante.
- ⇒ elles cèdent lorsque la pression qu'elles exerçaient diminue.

Dans tous les cas elles doivent rester **au contact** pour agir au moment voulu et ne pas surprendre le cheval.

La première action des jambes apprise par le jeune cheval est une action **impulsive** par pressions simultanées des deux mollets au niveau de la sangle. Elle permet de provoquer le mouvement en avant et de créer, d'entretenir ou d'augmenter l'impulsion.

Le réflexe impulsif n'est pas naturel ; il doit être appris, amélioré et entretenu. Pour cela on utilise la leçon de jambes dont le principe est d'associer une pression de mollet derrière la sangle avec un appel de langue ou un coup de cravache en arrière de la jambe lorsque l'obéissance à une pression des mollets n'est pas immédiate.

Lorsque le niveau de dressage du jeune cheval évolue, une jambe peut en suite agir seule :

- ⇒ A la sangle, pour incurver le cheval.
- ⇒ Reculée en arrière de la sangle, pour déplacer l'arrière main dans le sens opposé.

Lorsque une jambe agit seule et en arrière de la sangle, on parle de **jambe isolée**.

Schématiquement, la **résistance** des jambes intervient :

- ⇒ pour **conserver l'engagement des postérieurs**, les jambes résistent alors simultanément et au niveau de la sangle (notamment dans les transitions descendantes et pour le travail de mise sur la main)
- ⇒ pour **s'opposer au déplacement latéral de l'arrière main**, on observe dans ce cas la résistance d'une jambe isolée (notamment dans le travail autour de l'incurvation).

124. LES MAINS

Les mains sont en contact direct avec la bouche du cheval par l'intermédiaire des rênes et du mors. Elles **agissent essentiellement au niveau de l'avant-main** ; d'une part en déterminant l'attitude de la tête et de l'encolure et d'autre part en mobilisant les épaules.

De même que pour les jambes, elles peuvent **agir, résister ou céder** de façon simultanée ou d'un seul côté. Elles **interviennent ainsi principalement dans le contrôle et la régulation de la direction, de l'impulsion et de l'équilibre**.

Les mains ne doivent jamais se déplacer vers l'arrière, dans ce cas le cavalier commet une faute, on dit qu'il « tire sur les rênes ». Elles doivent accompagner le mouvement du balancier cervico-céphalique.

Comme nous l'avons déjà vu le **contact** qui s'établit entre la bouche du cheval et les mains du cavalier doit être **moelleux et permanent** ; il est le **résultat de la tension du cheval sous l'effet de l'impulsion**.

125. L'ACCORD DES AIDES – EXEMPLE DE L'INCURVATION

Dans la pratique, une aide n'agit jamais de façon isolée ; les actions des différentes aides se coordonnent en permanence.

L'**accord des aides** est donc le concours que le cavalier doit obtenir de ses jambes, de ses mains et de son poids du corps pour permettre, faciliter et hâter la bonne exécution des mouvements demandés. Pour cela, il doit d'abord accéder à l'**indépendance des aides** c'est à dire la capacité à faire intervenir une aide sans que cela n'ait de conséquence sur le reste de son corps.

Comme nous l'avons déjà vu, chaque aide peut **agir, résister et céder**. Le cavalier peut de plus faire **varier l'intensité et la durée** de ses actions en fonction de la réponse de sa monture, c'est ce que l'on appelle le **dosage**.

Ainsi, si le schéma général est enseigné pour chaque type d'exercice, le dosage des différentes aides dépend exclusivement de la situation et fait appel aux capacités d'**évaluation et d'adaptation** du cavalier.

EMPLOI ET ACCORD DES AIDES : EXEMPLE DE L'INCURVATION.

L'incurvation correspond à la courbure que dessine le rachis dans le plan horizontal.

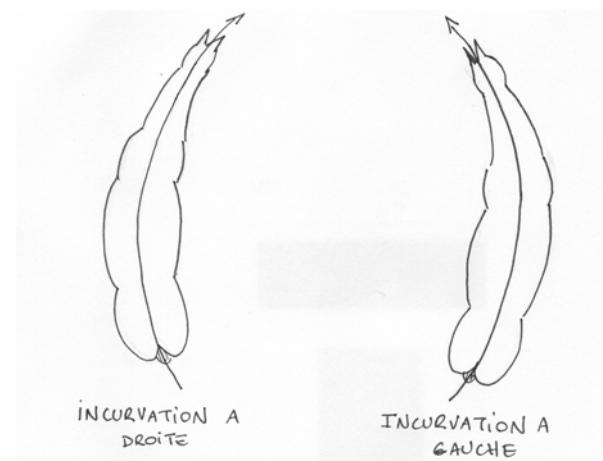


Figure n°76. Orientation de l'incurvation.

Plusieurs situations et exercices exigent que le cheval soit incurvé ; notamment dès que le cheval réalise une courbe. L'incurvation peut aussi se superposer à un déplacement latéral, dans l'épaule en dedans par exemple.

L'orientation de l'incurvation doit être adaptée à la trajectoire et à l'exercice souhaité. C'est au cavalier de doser le degré de courbure que doit réaliser le rachis de son cheval.

Les aides de l'incurvation se définissent classiquement de la manière suivante :

- ⇒ **Le poids du corps** reste au milieu du cheval
- ⇒ **La main intérieure** indique la direction sans tirer
- ⇒ **La main extérieure** contrôle le mouvement et l'impulsion, limite le fléchissement de l'encolure et maintient les épaules sur le tracé.
- ⇒ **La jambe intérieure** au centre (à la sangle) incurve le rachis et entretien l'impulsion
- ⇒ **La jambe extérieure** légèrement reculée (derrière la sangle) maintient les hanches sur la courbe.

Ainsi, le cavalier devra **contrôler l'orientation** de sa monture c'est-à-dire le degré de courbure désiré sans pour autant négliger **l'impulsion et l'équilibre**. Le cavalier pourra juger de la justesse de l'incurvation et de l'attitude de son cheval par les sensations d'« équilibre » et de « résistance » et réagir en conséquence. Pour cela il devra **adapter à chaque instant le dosage entre ces différentes aides en fonction de la situation**.

2. ACTION DU CAVALIER SUR LA COLONNE VERTEBRALE DE SON CHEVAL, APPLICATION DANS LES PRINCIPES L'ART EQUESTRE.

N.B. Dans cette partie nous allons exploiter les données traitées dans les deux premières parties de ce travail. Ainsi, pour certaines références se reporter aux paragraphes mentionnés entre crochets.

21. ANALYSE BIOMECHANIQUE DE L'IMPULSION ET DE « L'ACTION IMPULSIVE ».

Nous venons de voir que l'impulsion se caractérise par l'**engagement** et par la force de **poussées** des membres postérieurs, deux actions à priori non liées mécaniquement.

Nous proposons tout d'abord dans les paragraphes suivants une analyse biomécanique de ces actions.

211. DEFINITION DE L'ENGAGEMENT ET DE LA POUSEE DES MEMBRES POSTERIEURS AUX DIFFERENTES ALLURES.

[Cf. 2^{ième} partie, § 3111 et 3112.]

La **poussée** des postérieurs correspond à la **phase de propulsion** de l'appui du membre qui commence après le mi-appui et se termine avant la levée du membre. On l'observe donc :

- ⇒ **Au pas**, de la seconde moitié du 2^{ième} temps jusqu'au début du 3^{ième} et de la seconde moitié du 4^{ième} temps jusqu'au début du 1^{er}.
- ⇒ **Au trot**, pendant la seconde moitié de chacun des temps jusqu'au commencement de la phase suspension.

⇒ **Au galop**, pendant le 2^{ième} temps pour le postérieur poursuivant et au début 3^{ième} temps pour le postérieur meneur.

L'**engagement** des postérieurs correspond à la **phase de protraction du soutien** du membre qui commence après le mi-soutien et se termine avant le poser du membre. On l'observe donc :

- ⇒ **Au pas**, de la seconde moitié du 2^{ième} temps jusqu'au début du 3^{ième} et de la seconde moitié du 4^{ième} temps jusqu'au début du 1^{er}.
- ⇒ **Au trot**, pendant la seconde moitié de chacun des temps et toute la phase suspension.
- ⇒ **Au galop**, pour le membre postérieur poursuivant pendant la phase de suspension et pour le membre postérieur meneur durant tout le premier temps.

Dans les **allures symétriques** (le pas et le trot), les membres postérieurs s'engagent alors que leurs homologues controlatéraux réalisent leur phase de propulsion. Dans ces deux allures, on pourra donc davantage observer **une limitation des mouvements des membres postérieurs par manque de souplesse ou de décontraction** de certains groupes musculaires. Par exemple, les muscles fémoraux caudaux peuvent intervenir comme facteurs limitants l'engagement des membres postérieurs.

Au galop, on observe que les deux postérieurs réalisent la même action avec un simple décalage temporel. Dans cette allure, il semble donc que seul le membre **postérieur meneur** a une **réelle action propulsive** et que son homologue controlatéral joue plutôt un rôle dans l'amortissement.

212. ANALYSE DE LA POUSEE DES POSTERIEURS

La phase de propulsion commence après le mi-appui et se termine avant la levée du membre. Elle correspond donc à la **puissante détente de l'ensemble du membre postérieur** qui a lieu pendant la seconde moitié de l'appui. Cette action est facilitée par une extension thoraco-lombo-sacrée. (Denoix 1988)

Nous avons vu que le mi-appui correspond à la fin de la phase de chargement des membres, illustrée par une réaction verticale du sol maximale. Ainsi, on peut supposer que l'énergie emmagasinée jusqu'à ce moment va alors être relarguée et contribuer à la détente de l'ensemble du membre postérieur à l'origine de la propulsion du corps vers l'avant (Merkens et coll. 1993).

[Cf. 2^{ième} partie, § 333]

INTERVENTION MUSCULAIRE DANS LA PROPULSION DES MEMBRES POSTERIEURS

(D'après Denoix 1988) (Cf. figure n°76)

[Cf. 1^{ière} partie, § 441. et 442. et 2^{ième} partie, § 3321.]

L'extension de l'ensemble du membre postérieur à l'appui peut faire intervenir les **contractions concentriques** simultanées des muscles fessiers et des muscles fémoraux :

- ⇒ le muscle **fessier moyen** intervient en tant que puissant extenseur de la cuisse et extenseur de l'articulation lombo-sacrale.
- ⇒ les **muscles fémoraux** (notamment le quadriceps et les muscles fémoraux caudaux) participent à la détente de l'ensemble de la jambe et contribuent à limiter la bascule du bassin vers l'avant.

La masse commune de l'**erector spinae** peut de plus participer à la propulsion en participant à l'extension thoraco-lombo-sacrale, c'est le cas au galop.

Les études électromyographiques ont par ailleurs montré qu'au trot, le muscle fessier moyen est inactif pendant la phase de propulsion. Cependant dans cette allure, la colonne thoraco-lombaire réalise une flexion durant cette phase.

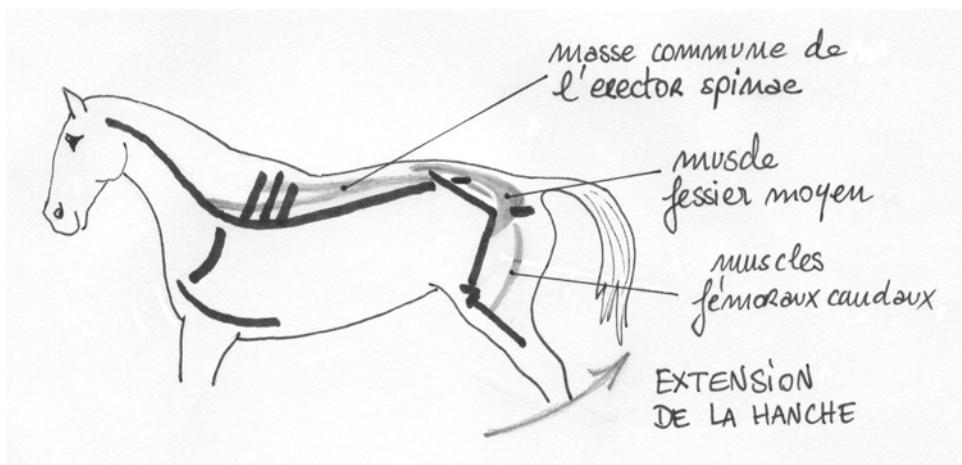


Figure n°77. Principaux acteurs musculaires pouvant potentiellement intervenir dans la poussée des membres postérieurs. (d'après Denoix 1988)

213. ANALYSE DE L'ENGAGEMENT DES POSTERIEURS

La phase de protraction commence après le mi-soutien et se termine avant le poser du membre.

Dans un premier temps, toutes les articulations sont donc fléchies et on observe l'avancée du membre sous la masse corporelle. Cette action est facilitée par d'une flexion de l'articulation lombo-sacrée. Puis en fin de phase, une dissociation des mouvements articulaires permet de préparer l'amortissement au contact du sol ; la flexion de la hanche diminue tandis que tous les autres angles articulaires (du genou au boulet) s'étendent rapidement.

INTERVENTION MUSCULAIRE DANS LA PROTRACTION DES MEMBRES POSTERIEURS

(D'après Denoix 1988) (Cf. figure n°78)

[Cf. 1^{ière} partie, § 423., 424., 442. et 2^{ème} partie, § 3321.]

La **contraction concentrique** du muscle **ilio-psoas** permet de flétrir avec une légère rotation externe le rayon fémoral et participe donc à l'avancée de l'ensemble du membre postérieur sous la masse corporelle.

En fin de protraction, la **contraction concentrique** des muscles **fémoraux crâniaux** contribue à l'extension du genou. De par leur insertion sur l'acétabulum, ils maintiennent aussi en partie la flexion de la hanche.

La **contraction concentrique** des muscles **abdominaux** peut de plus contribuer à l'avancer du membre en participant à la flexion thoraco-lombo-sacrée ; c'est le cas au galop.

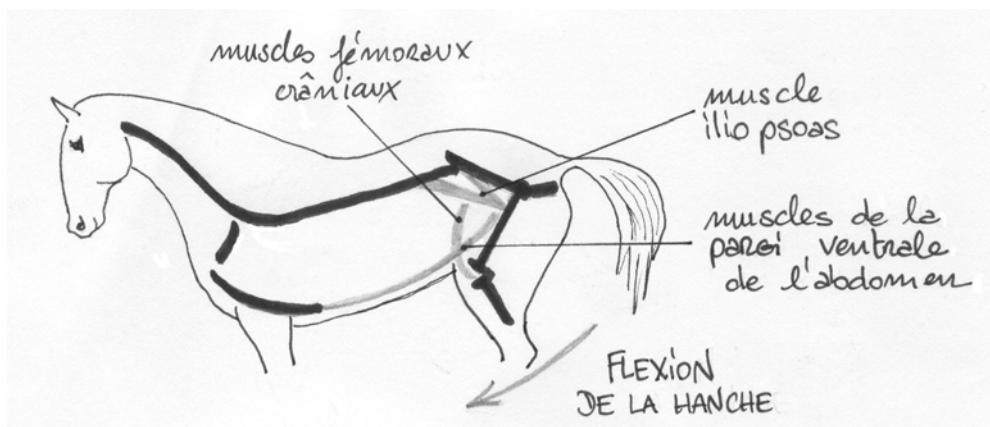


Figure n°78. Principaux acteurs musculaires pouvant potentiellement intervenir dans l'engagement des membres postérieurs. (d'après Denoix 1988)

Par ailleurs, les études électromyographiques ont montré qu'au trot, les muscles **extenseurs de la hanche** (biceps fémoral et fessier moyen) sont actifs en fin de suspension et au début de l'amortissement. Ainsi, en limitant l'extension thoraco-lombo-sacrée induite par l'accélération de la masse viscérale dans cette allure, cette action peut faciliter en même temps la fin de la protraction du membre postérieur.

214. CORRELATIONS ENTRE LES MOUVEMENTS VERTEBRAUX, LA POUSSÉE ET L'ENGAGEMENT DES MEMBRES POSTERIEURS

Les études sur la cinématique vertébrale in vivo ont montré qu'aux trois allures, la colonne vertébrale est animée d'un mouvement ondulatoire dans les trois dimensions de l'espace. De plus, une interaction directe entre les mouvements des membres et ceux de la colonne thoraco-lombaire est fortement suspectée.

[Cf. 2^{ième} partie, § 3312 et 3313]

Au pas et au galop, le mouvement semble se propager de la zone lombo-sacrée vers la région thoracique crâniale. Ainsi, on peut penser que les membres postérieurs auraient un rôle principal dans la genèse des mouvements vertébraux en tant qu'agent propulseur via les articulations sacro-iliaques. Par ailleurs, dans ces deux allures, les phases de propulsion postérieure sont simultanées avec l'extension thoraco-lombaire. De même, les phases de protraction interviennent en même temps que la flexion thoraco-lombaire.

Au trot, le mouvement semble au contraire se propager d'avant vers l'arrière. De plus, on observe qu'à cette allure la propulsion n'est pas facilitée par les mouvements vertébraux ; d'une part car la colonne thoraco-lombaire réalise une flexion pendant la propulsion postérieure et d'autre part car le muscle fessier moyen est alors inactif. En parallèle, l'**engagement** des membres postérieurs **semble davantage favorisé**, notamment par une flexion thoraco-lombaire maximale lors du début de la protraction et qui pourrait être ensuite potentiellement entretenue par l'activité des muscles extenseurs de la hanche en fin de suspension. Ainsi, on peut penser que le trot est une allure utilisant un mécanisme locomoteur très différent de celui du pas et du galop. Nous avons déjà vu que dans cette allure sautée où l'action du balancier cervico-céphalique est quasiment absente et l'amplitude des mouvements vertébraux relativement faible, le mécanisme locomoteur semble davantage adapté à une rigidification de l'axe vertébral pour résister aux forces dues à l'accélération des masses viscérales. Les études électromyographiques semblent confirmer cette

hypothèse. Enfin, l'avantage donné à l'engagement des membres postérieurs pourrait être un moyen d'augmenter la force propulsive. En effet, on peut y voir un moyen d'allonger la durée de la phase de chargement du membre et ainsi d'augmenter l'énergie emmagasinée au moment du mi-appui (Bouisset 2002).

[Cf. 2^{ième} partie, § 156 et 333]

215. ANALYSE DE « L'ACTION IMPULSIVE » DU CAVALIER

Dans ce paragraphe nous proposons de discuter de l'approche de l'impulsion par le cavalier en la confrontant aux données que nous venons d'aborder sur ce sujet.

2151. LES AIDES ET ACTIONS « IMPULSIVES »

Hormis les aides artificielles telles que la cravache ou la chambrière, essentiellement deux aides permettent au cavalier de stimuler et de contrôler l'impulsion de sa monture : les **jambes** et le **poids du corps**.

Nous n'aborderons pas l'action des éperons bien qu'elle puisse être très intéressante sur le plan mécanique. Nous nous contenterons seulement de signaler que leur utilisation permet de prolonger et d'affiner l'action de jambe mais qu'ils ne peuvent pas la remplacer totalement.

LES JAMBES

Les jambes sont les aides les plus importantes de l'impulsion et elles font partie des premières actions que l'on enseigne au jeune cheval et au cavalier débutant ; une pression simultanées des deux mollets au niveau de la sangle provoque ou ravive le mouvement en avant.

Par la suite, lorsque le niveau de dressage évolue, cette action s'affine et se complexifie en se coordonnant aux autres aides. Mais qu'elle agissent uni ou bilatéralement par de brèves actions ou par pressions plus constantes, elle s'applique en principe toujours au niveau du passage de sangle.

Bien sûr, cette action agit en grande partie par le jeu d'un réflexe conditionné et entretenu par ce que l'on appelle la leçon de jambes. [Cf. 3^{ième} partie, § 123.] Néanmoins, on peut aussi supposer qu'un phénomène purement mécanique de contractions musculaires concentriques en réponse à une stimulation tactile vienne en partie favoriser l'action de cette aide. En effet, quand elle agit au

niveau de la sangle, la jambe vient stimuler le muscle pectoral ascendant et les insertions crâniales des muscles de la paroi ventrale de l'abdomen. Ainsi l'action de jambe pourrait être capable de provoquer la flexion de l'articulation lombo-sacrée et de favoriser l'engagement des membres postérieurs.

LE POIDS DU CORPS

Le poids du corps peut aussi influencer l'impulsion, notamment au pas et au galop. Ainsi, un report de l'ensemble du poids du corps vers l'avant ou vers l'arrière joue un rôle dans les variations d'allures et les transitions. Un cavalier peut aussi augmenter la vitesse et la cadence de l'allure en « poussant » avec ses fesses c'est-à-dire en précédant le mouvement de bascule qu'il reçoit par le dos de son cheval. Cette action étant en général plus préjudiciable que bénéfique car déstabilisante pour l'équilibre du cavalier mais aussi pour celui du cheval qui aura tendance à augmenter sa cadence, on dit alors que ce dernier « précipite son allure ». Néanmoins d'après certains instructeurs, cette action réalisée dans le sens inverse peut s'avérer intéressante pour ralentir la cadence et rétablir l'équilibre, on parle alors de « suivre le mouvement à regret », c'est-à-dire résister dans le bassin afin d'avoir un léger retard sur le mouvement de bascule du dos du cheval. Cette dernière action associée à une résistance des deux jambes appliquée au niveau de la sangle, a pour résultat de ralentir la cadence tout en favorisant l'engagement des postérieurs c'est-à-dire de « rassembler » l'allure.

Au trot, cette action du poids du corps semble plus limitée. Ce ressenti du cavalier est en accord avec les observations et les hypothèses que nous venons de traiter au sujet du mécanisme locomoteur de cette allure.

2152. LE TRAVAIL DE L'IMPULSION

Pour le cavalier, il semble que l'**engagement** des membres postérieurs soit la **composante la plus importante** pour évaluer et améliorer l'impulsion de sa monture. Plusieurs hypothèses peuvent soutenir cette observation.

Premièrement, on peut considérer que la force propulsive est une qualité propre à chaque individu et qu'elle est difficilement améliorable par le travail. Ainsi, un animal présentant des allures peu rebondies a peu de chances de développer par la suite des allures aériennes.

Au contraire, l'**engagement** des postérieurs fait appel d'une part à la souplesse des muscles de la ligne du dessus (erector spinae, fessier moyen et muscles

fémoraux caudaux) et d'autre part à la puissance de la ligne musculaire du dessous (muscles abdominaux, ilio-psoas et muscles fémoraux caudaux), ces deux qualités étant beaucoup plus faciles à améliorer par un travail physique adapté.

Enfin, on peut supposer qu'un meilleur engagement favorise une meilleure propulsion en augmentant la durée de la phase d'amortissement. En effet, comme nous l'avons déjà vu, l'allongement de la phase de chargement du membre permet d'augmenter l'énergie emmagasinée au moment du mi-appui et donc une plus grande libération d'énergie lors de la phase de propulsion (Bouisset 2002).

22. ANALYSE DE LA MISE SUR LA MAIN

La mise sur la main correspond à une **attitude globale** du cheval qui « fonctionne dans le bon sens ». Nous avons évoqué le fait que pour le ressenti du cavalier, ce phénomène est le **résultat de la transmission d'une tension par la ligne du dessus, générée par l'impulsion postérieure et récupérée par la main**. Chez le cheval, on observe alors un changement d'attitude qui porte essentiellement sur trois points :

- ⇒ L'engagement des membres postérieurs et le report de l'équilibre vers les hanches.
- ⇒ La montée de la base du garrot.
- ⇒ La cession à la main et la bascule de la nuque.

Nous proposons dans ce paragraphe de tenter d'analyser les phénomènes mécaniques qui sous tendent ces attitudes puis de discuter l'action potentielle du cavalier sur la région axiale, au travers de l'expérience de ses sensations.

221. LA FLEXION LOMBO-SACRALE - EQUILIBRE VERS LES HANCHES.

L'**articulation lombo-sacrée** présente une **mobilité relativement importante en flexion/extension** grâce notamment à ces caractéristiques anatomiques. De plus, on observe à ce niveau une **laxité du ligament supra-épineux** qui diminue fortement l'influence de la tension de ce dernier sur la mobilité de cette articulation. [Cf. deuxième partie, § 3213 et 3214.]

La **charnière thoraco-lombaire** présente elle aussi une **mobilité en flexion/extension relativement importante**. Les acteurs musculaires qui tendent

à la fléchir sont par ailleurs en partie les mêmes que pour l'articulation lombo-sacrée.

Ainsi, les flexions lombo-sacrée et thoraco-lombaire, interviennent le plus souvent simultanément. On parle alors de **flexion du pont thoraco-lombo-sacral** qui est à l'origine d'un mouvement de **bascule du bassin** vers l'avant c'est-à-dire sous la masse du cheval.

Principalement deux groupes musculaires permettent cette flexion :

- ⇒ Les muscles ilio-psoas et petit psoas.
- ⇒ Les muscles de la paroi ventrale de l'abdomen.

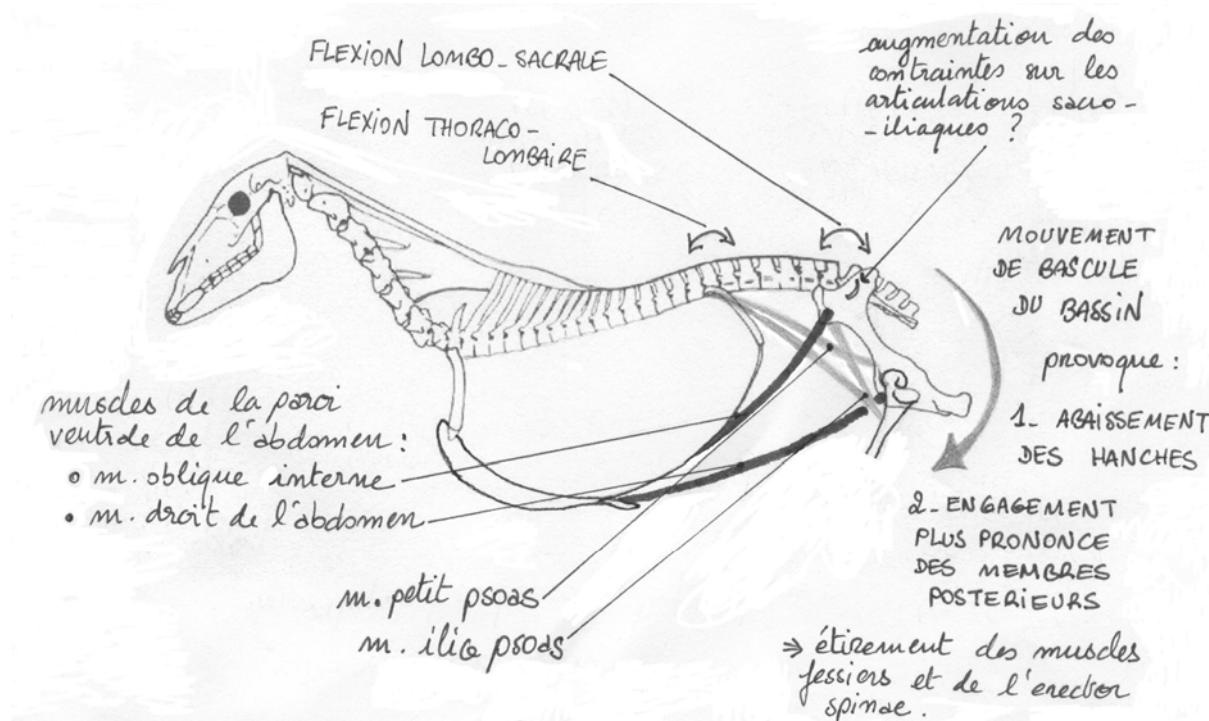


Figure n°79. La flexion thoraco-lombo-sacrée : principaux acteurs musculaires et conséquences sur la locomotion.

(Adapté d'après Denoix et Pailloux 2001a et Thuilliez 2003)

Cependant, la flexion thoraco-lombo-sacrée peut être à l'origine de **contraintes au niveau de la région pelvienne**. En effet, on peut penser que les **articulations sacro-iliaques** subissent alors un **mouvement de nutation** créant d'avantage de forces de traction au niveau des **ligaments sacro-iliaques dorsaux**. De plus la souplesse des muscles antagonistes (muscles fessiers, masse commune de l'erector spinae) est alors beaucoup plus sollicitée.

[Cf. 2^{ème} partie, § 3214 et 3224.]

Néanmoins, la **bascule du bassin** procure au cavalier **deux avantages pour la locomotion de son cheval :**

- ⇒ **l'abaissement des hanches** sous la masse corporelle qui modifie l'**équilibre du cheval.**
- ⇒ **un engagement des membres postérieurs** plus prononcé qui se répercute sur l'**impulsion.**

222. LA FLEXION CERVICALE HAUTE - BASCULE DE LA NUQUE.

[Cf. 1^{ière} partie § 321. et 41., 2^{ième} partie, § 3221]

L'articulation **atlanto-occipitale** est le siège principal des mouvements de flexion et d'extension au sein de l'encolure. Elle est en partie contrôlée par les **muscles de la nuque**. Or, ce système musculaire permet de mobiliser la tête indépendamment du reste de l'encolure.

Ainsi, une **flexion cervicale haute** correspond à une **bascule de la nuque** décrite en équitation.

Elle peut mettre en jeu deux types de musculature :

- ⇒ Les muscles de la nuque dont le muscle long de la tête.
- ⇒ Les muscles dont l'action s'étend sur l'encolure, notamment le muscle sterno-céphalique et le muscle long du cou.

(Cf. figure n°80)

La flexion de la nuque peut donc intervenir indépendamment du reste du corps mais comme nous le verrons plus loin, elle peut aussi être intégrée au sein d'un mouvement d'ensemble de la région axiale.

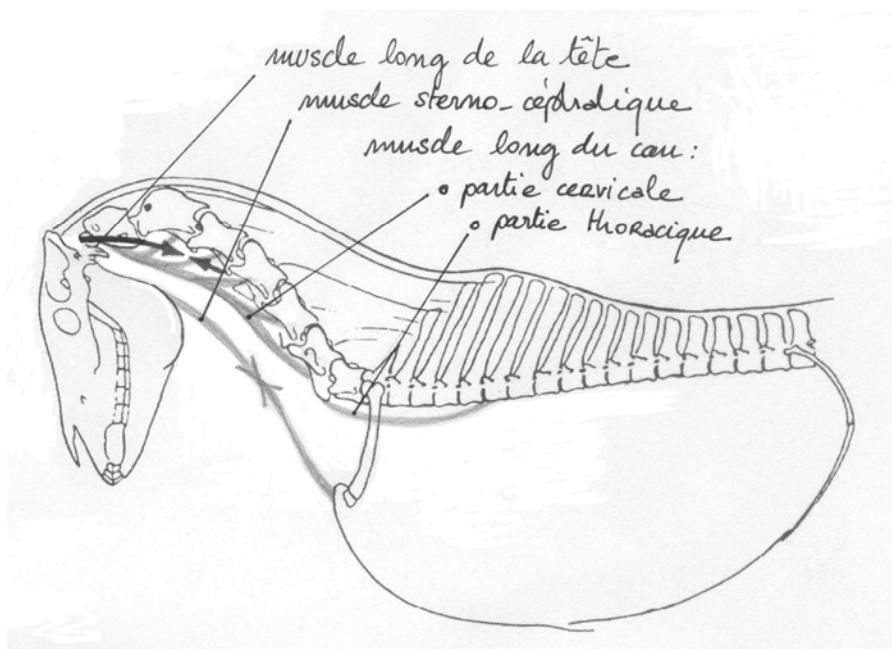


Figure n°80. La flexion cervicale haute : principaux acteurs musculaires.

(Adapté d'après Denoix et Pailloux 2001a)

223. INFLUENCE DE LA POSITION DE L'ENCOLURE

Les régions cervicale, thoracique et lombo-sacrée de la colonne vertébrale présentent une continuité anatomique et fonctionnelle. Cette dernière est en grande partie assurée par le ligament nuchal et le ligament supra-épineux et par les muscles du tronc et de l'encolure qui s'insèrent dans au moins deux régions de la colonne vertébrale.

[Cf. 1^{ière} partie, § 3123. et 3124. et 2^{ième} partie, § 3223.]

Ainsi, nous allons voir dans ce paragraphe quelles sont les conséquences de la position de l'encolure sur la mécanique de la colonne thoraco-lombaire.

2231. INFLUENCE DU RELEVER DE L'ENCOLURE

[Cf. 1^{ière} partie, § 3214., 412., 413. et 2^{ième} partie, § 3221]

Le relever de l'encolure correspond au redressement de l'ensemble du segment cervico-céphalique. Au niveau vertébral, il se traduit donc par un mouvement d'**extension cervico-thoracique** que l'on qualifie aussi **extension cervicale basse**.

Ainsi ce mouvement concerne principalement la charnière cervico-thoracique (C6-T2) qui présente une mobilité en flexion et en extension relativement importante.

Les principaux extenseurs de l'encolure sont les muscles cervicaux dorsaux qui s'insèrent sur les vertèbres thoraciques mais aussi par continuité les muscles épineux et longissimus de l'erector spinae qui prolongent dans la région thoracique les muscles épineux et longissimus du cou.

(Cf. figure n°81)

Notons que les muscles splénius et semi-épineux de la tête sont à la fois extenseurs de l'encolure et de la tête.

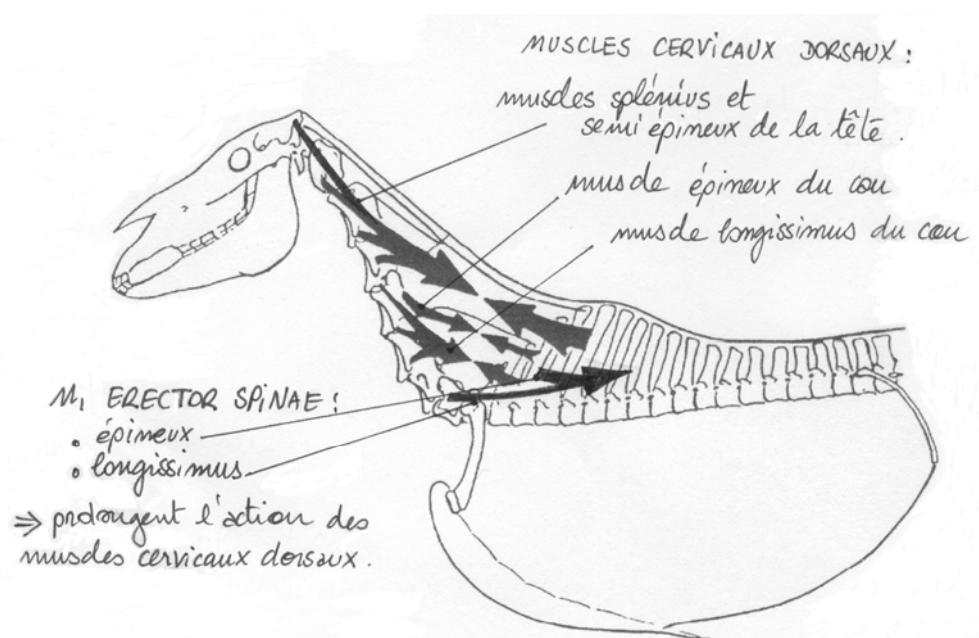


Figure n°81. Le relever de l'encolure : principaux acteurs musculaires.

(D'après Denoix et Pailloux 2001a)

Au niveau mécanique, le redressement du segment cervico-céphalique doit théoriquement s'accompagner d'un déplacement du centre de gravité vers l'arrière. Ce phénomène se traduit par une surcharge de l'arrière main et un allégement de l'avant main c'est-à-dire en terme équestre un report de l'équilibre vers les hanches.

(Cf. figure n°82)

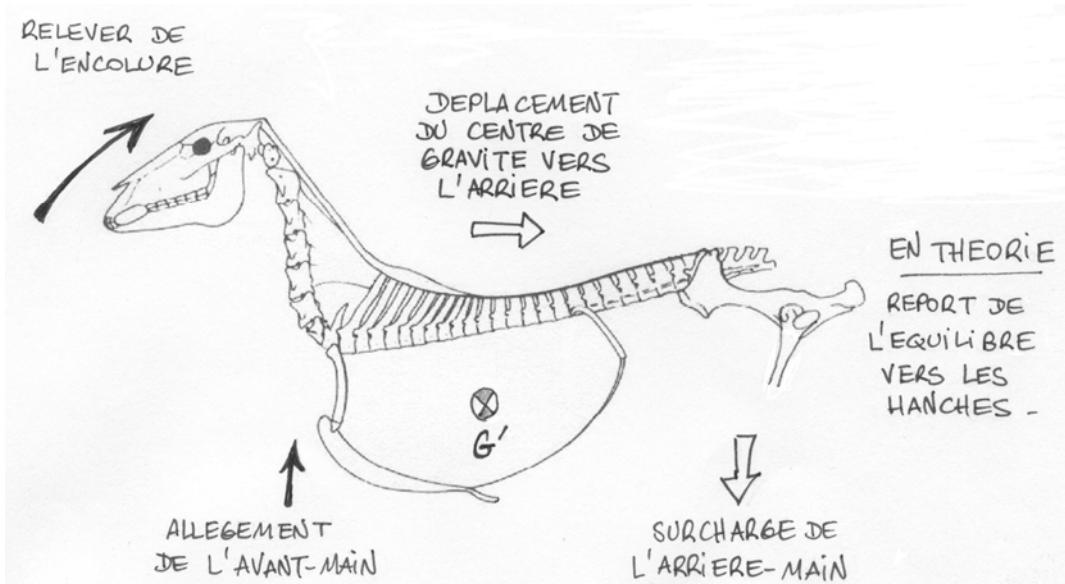


Figure n°82. Le relever de l'encolure : conséquences mécaniques.

(Adapté d'après Denoix et Pailloux 2001a et Delavenna 2003)

Cependant en pratique, les sensations du cavalier ne sont pas toujours tout à fait en accord avec cette approche.

En effet, au niveau vertébral, l'extension cervicale basse se traduit principalement par une diminution de la tension sur le ligament nuchal et donc par continuité du ligament supra-épineux. Par ailleurs la contraction des muscles de l'erector spinae et la diminution de tension sur le ligament supra-épineux, favorisent l'apparition d'une extension thoraco-lombaire.

Ainsi, dans l'hypothèse d'un relever de l'encolure associé à une contraction des muscles de l'erector spinae, on observera une extension cervicale et thoraco-lombaire. Dans la région du garrot, cette extension vertébrale se traduit par la bascule vers l'arrière et le rapprochement des processus épineux. Ce phénomène pourrait correspondre aux sensations « d'effondrement du garrot » ou encore de « cheval creux » décrites par le cavalier.

(Cf. figure n°83)

Notons enfin que pour le cavalier, il est possible d'obtenir de sa monture une attitude avec une encolure très relevée tout en conservant la sensation d'élévation de la base du garrot ; c'est ce que l'on appelle le rassembler. Cependant, cet exercice très physique exige que le couple ait un niveau de dressage élevé, et donc ne s'obtient qu'avec un cheval ayant subi plusieurs années de travail dans ce sens.

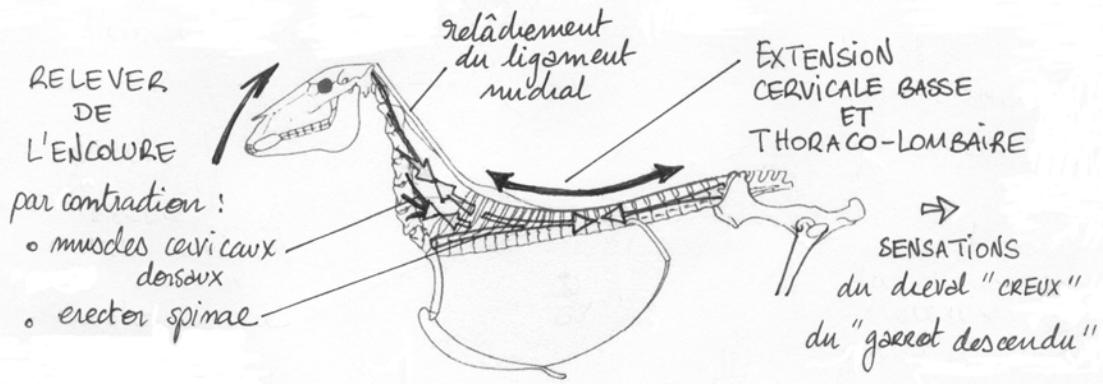


Figure n°83. Le relever de l'encolure et la contraction des muscles de l'erector spinae.

(Adapté d'après Denoix et Pailloux 2001a)

2232. INFLUENCE DE LA DESCENTE DE L'ENCOLURE

[Cf. 2^{ième} partie, § 3221. et 3223.]

(Denoix 1988)

(Cf. figure n°84)

L'abaissement de l'encolure impose sur le cheval en mouvement une série de modifications fonctionnelles dans les différentes parties du corps. L'attitude globale en résultant dépend notamment de l'adaptation de l'arrière main de l'animal à ces nouvelles contraintes.

Les principaux muscles intervenant dans la descente de l'encolure sont les muscles cervicaux ventraux : les muscles scalènes, long du cou, sterno-céphalique et brachio-céphalique.

La première conséquence de la descente de l'encolure est purement mécanique ; il s'agit d'un **déplacement du centre de gravité vers l'avant**. On observe alors une **surcharge de l'avant main** associée à un **allègement de l'arrière main**. En terme équestre ce phénomène correspond à un **report de l'équilibre vers les épaules**.

Par ailleurs, cette position entraîne une **augmentation de la tension** sur le **ligament nuchal** et par continuité sur le **ligament supra-épineux** ainsi qu'un étirement des **muscles cervicaux dorsaux**. Les muscles qui mobilisent la jonction cervico-céphalique sont les plus sollicités.

Au niveau vertébral, la traction exercée par le ligament nuchal au niveau des processus épineux du garrot provoque une **flexion de la colonne thoracique**, plus marquée au niveau de T5-T10.

La traction exercée sur le ligament supra épineux se transmet caudalement jusqu'aux vertèbres lombaires. Cependant, il semble qu'elle ne soit pas en mesure de modifier la mobilité de l'articulation lombo-sacrée car comme nous l'avons déjà évoqué, on observe une laxité de ce ligament à ce niveau.

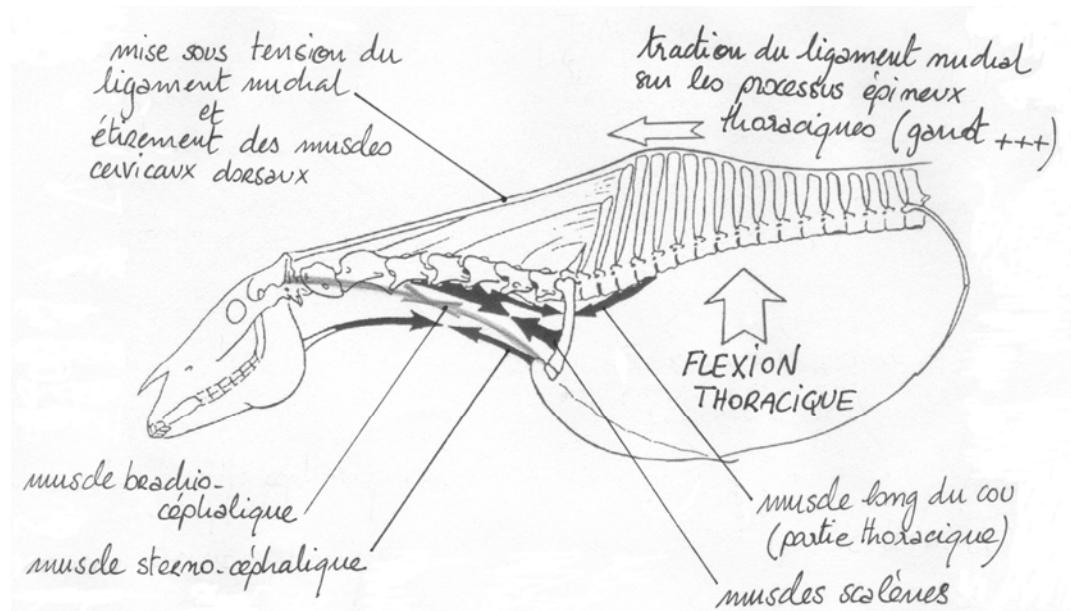


Figure n°84. La descente de l'encolure :

Principaux acteurs musculaires et conséquences sur l'axe vertébral.
(Adapté d'après Denoix 1988)

Ainsi deux attitudes sont par la suite envisageables :

- ⇒ Soit le cheval n'adapte pas son arrière main et va vers un équilibre sur les épaules.
- ⇒ Soit le cheval adapte son arrière main pour conserver son équilibre initial.

CAS DE LA DESCENTE DE L'ENCOLURE SANS ADAPTATION DE L'ARRIÈRE-MAIN.

(Cf. figure n°85)

La **descente de l'encolure** s'accompagne d'un déplacement du **centre de gravité vers l'avant** et si le cheval ne modifie pas le fonctionnement de son arrière main on observera une **surcharge de l'avant main** et un **allègement de l'arrière main**. En terme équestre, l'équilibre est reporté sur les épaules.

Ainsi, sous l'effet de la surcharge des épaules et de la traction des ligaments nuchal et supra-épineux, l'attitude générale aura tendance à présenter :

- ⇒ Une élévation des hanches et de la croupe par rapport au garrot.
- ⇒ Un engagement des membres postérieurs moins prononcé.

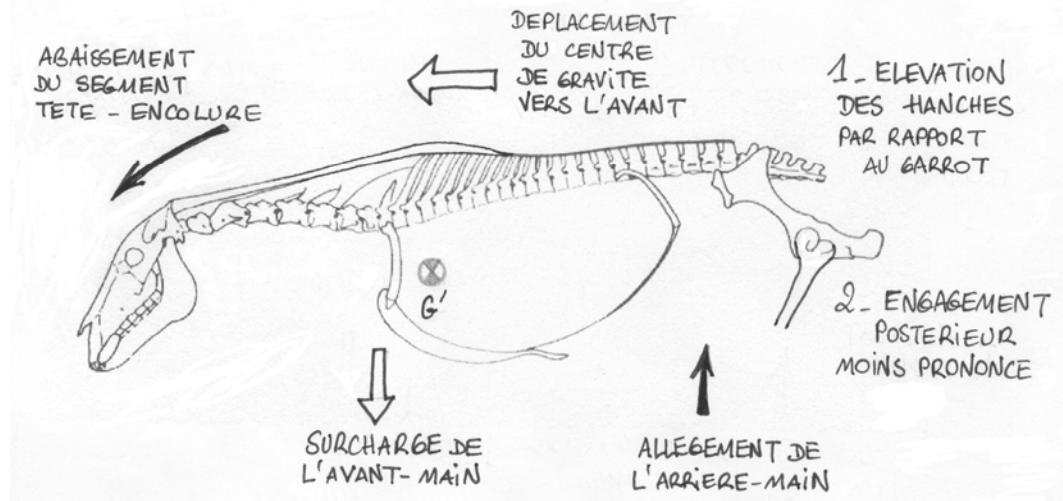


Figure n°85. Conséquences de la descente de l'encolure sur la locomotion :

Cas du cheval qui n'adapte pas son arrière main et va vers un équilibre sur les épaules.

(Adapté d'après Denoix 1988)

CAS DE LA DESCENTE DE L'ENCOLURE ASSOCIEE A UNE ADAPTATION DE L'ARRIÈRE-MAIN.

(Cf. figure n°86)

Nous venons de voir que la **descente de l'encolure** s'accompagne d'un déplacement du **centre de gravité vers l'avant** et si le cheval ne modifie pas le fonctionnement de son arrière main on observera un transfert de **l'équilibre vers les épaules**.

En effet, pour lutter contre ce phénomène et rétablir son équilibre initial le cheval doit **reporter du poids sur son arrière main** afin de reculer son centre de gravité. La seule solution consiste pour lui à **abaisser les hanches et engager davantage les membres postérieurs** par une **flexion lombo-sacrée**.

Ainsi, c'est principalement par la **contraction des muscles de la paroi de l'abdomen et de l'ilio-psoas** que le cheval en mouvement peut conserver le même équilibre tout en abaissant son encolure.

Les conséquences de cette attitude imposant une contrainte en flexion à chaque extrémité de la colonne vertébrale sont :

- ⇒ Une augmentation de la tension sur les ligaments supra-épineux et nuchal qui accentue d'avantage la flexion thoracique.
- ⇒ Un étirement des muscles fessiers et de la masse commune de l'erector spinae.

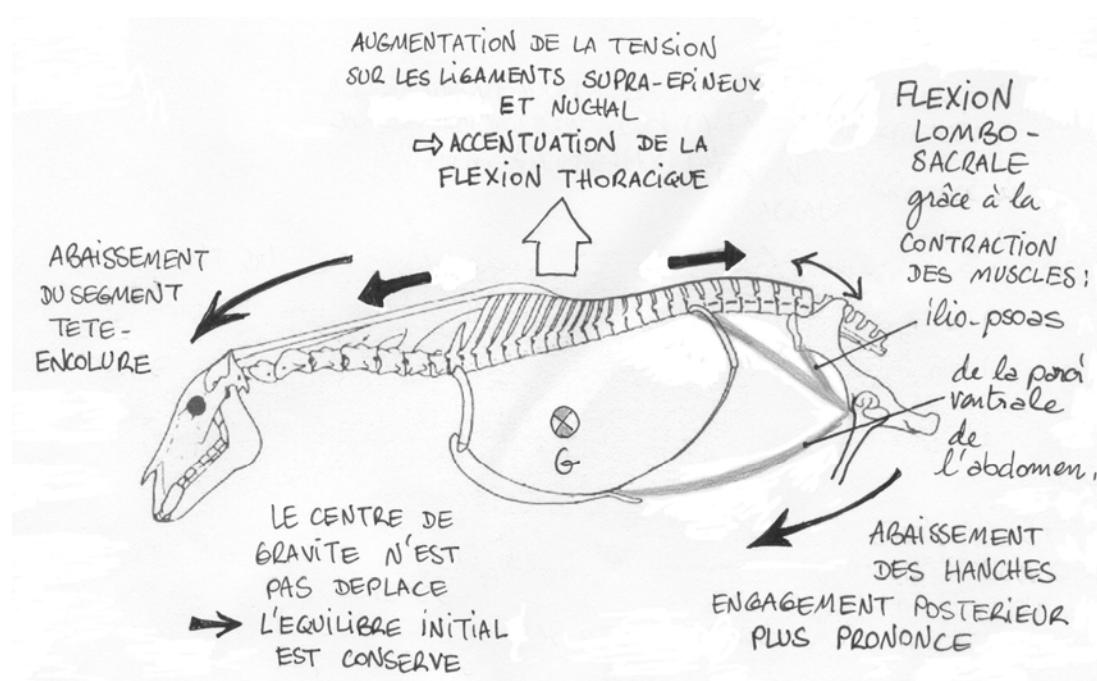


Figure n°86. Conséquences de la descente de l'encolure sur la locomotion :
 Cas du cheval qui n'adapte pas son arrière main et conserve son équilibre initial.
 (Adapté d'après Denoix 1988)

Cependant, il semble évident qu'un tel système de compensation est limité. Ceci peut en partie expliquer deux principes équestres qui sont traditionnellement enseignés : « Dans le travail, la descente de l'encolure ne doit pas aller au-delà de l'horizontale si l'on veut conserver impulsion et équilibre. Pour rassembler l'allure de son cheval, il faut au préalable relever son encolure ».

2233. HYPOTHESE SUR LE MECANISME DE LA « MONTEE DE LA BASE DU GARROT »

(Cf. figure n°87)

Pour le cavalier, la montée de la base du garrot correspond à la sensation d'élévation du dos.

Au niveau vertébral, ce phénomène semble correspondre à une **flexion de la colonne vertébrale thoracique**. Les vertèbres situées en avant et sous la selle du cavalier (T5-T10) étant plus particulièrement concernées. En effet, à ce niveau, le **ligament supra-épineux est encore élastique** ce qui permet un écartement plus prononcé des processus épineux.

Comme nous venons de le voir, cette flexion thoracique peut théoriquement s'obtenir par une **descente de l'encolure**. Cependant, pour le cavalier, cette condition n'est pas suffisante. D'après son expérience, un cheval peut se déplacer avec l'encolure descendue sans que son garrot soit remonté. Dans ce cas, on dit que le « cheval n'est pas tendu », la solution consiste alors à augmenter l'impulsion, ce qui se traduit en général par un meilleur engagement des membres postérieurs grâce à la **contraction des muscles de la paroi ventrale de l'abdomen**.

Par conséquent, on peut supposer qu'un minimum de **flexion thoraco-lombo-sacrale** est aussi nécessaire à la montée du garrot.

De plus, on peut remarquer que dans l'**attitude du rassembler**, le cheval conserve son garrot monté alors que son encolure se redresse. Par conséquent la **flexion de la colonne thoracique** peut-être conservée en même temps qu'une **extension cervicale basse**.

On peut donc supposer que la tension simultanée du ligament nuchal et du ligament supra-épineux n'est pas la seule responsable de la flexion thoracique.

Par la **notion de caisson abdominal**, la contraction des muscles de la paroi de l'abdomen pourrait jouer un rôle important dans ce phénomène (Denioix et Pailloux 2001a). Cette notion se définit par des pressions créées par la résistance du diaphragme aux compressions de la sangle abdominale. L'ensemble de ces forces appliquées à la face ventrale des corps vertébraux peut participer à la flexion de la colonne thoraco-lombaire.

Enfin, la **flexion cervicale haute** peut aussi intervenir. D'une part car ce mouvement impose une **tension sur le ligament nuchal** et d'autre part car la **contraction de la partie thoracique du muscle long du cou** peut comprimer ventralement les corps vertébraux et donc participer à la flexion thoracique.

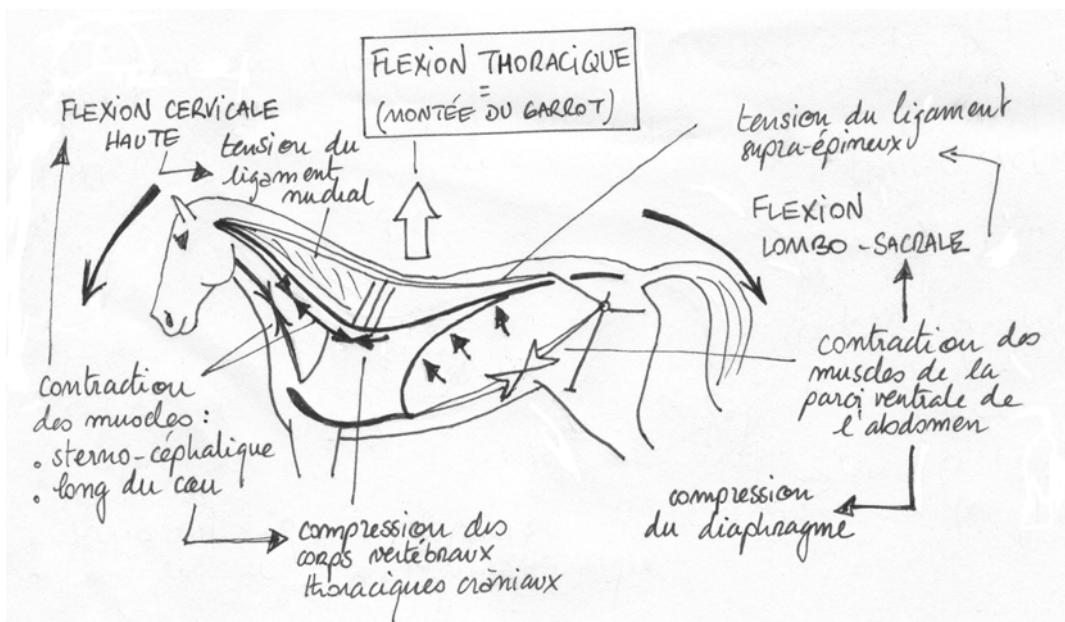


Figure n°87. Ensemble des phénomènes pouvant contribuer à la flexion thoracique.

224. HYPOTHESE SUR LE MECANISME DE LA MISE SUR LA MAIN

Pour le cavalier, la notion de mise sur la main se définit par l'image d'une tension qui part de l'impulsion des membres postérieurs, se transmet par la ligne du dessus pour être récupérée par la main. A cette image, il y associe les sensations d'équilibre et de légèreté.

Vue de l'extérieur, cette attitude se caractérise essentiellement par la réunion de :

- ⇒ L'engagement des membres postérieurs.
- ⇒ La montée de la base du garrot.
- ⇒ La cession à la main et la fermeture plus ou moins prononcée de l'angle tête-encolure.

Dans les paragraphes précédents, nous avons tenté d'explorer point par point la mécanique de ces attitudes, sans vraiment établir de lien entre elles.

La mise en commun de l'ensemble de ces données, permet de supposer qu'il existe un ensemble de phénomènes liés les uns aux autres qui pourrait sous tendre les sensations de la mise sur la main, notamment :

(Cf. figure n°88)

- ⇒ La contraction des muscles de la paroi ventrale de l'abdomen et de certains muscles cervicaux ventraux (sterno-céphalique et long du cou)
- ⇒ La mise sous tension du ligament nuchal et du ligament supra-épineux
- ⇒ La flexion vertébrale au niveau de la région cervicale haute, du segment thoracique et de l'articulation lombo-sacrée.

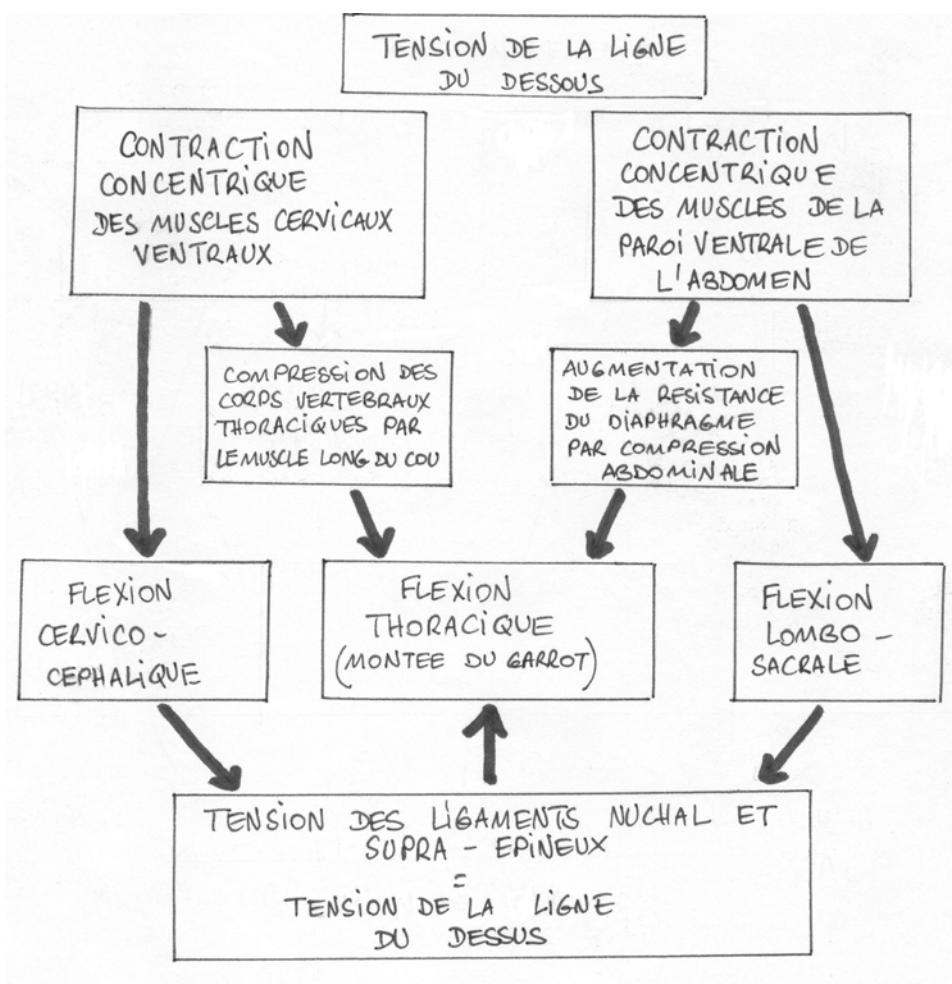


Figure n°88. « Ensemble de phénomènes liés les uns aux autres pouvant sous tendre les sensations du cheval mis sur la main. »

23. MISE SUR LA MAIN ET INCURVATION

Dans cet ultime paragraphe nous proposons tout d'abord de tenter d'analyser les points clés de l'incurvation du cheval, afin de prolonger par la suite notre réflexion sur la mise sur la main au travers son application chez un cheval incurvé sur un cercle.

231. L'INCURVATION : LES POINTS CLES DE SON MECANISME.

[Cf. 2^{ième} partie, § 3132.]

L'incurvation correspond à la courbure que dessine la colonne vertébrale dans le plan horizontal.

Nous allons étudier un des cas les plus simples où le cheval s'incurve pour marcher sur un cercle. L'orientation et le degré de courbure doivent être adaptés à la trajectoire. En terme équestre, on dit qu'un cheval est droit sur un cercle lorsque l'incurvation de sa colonne vertébrale s'adapte sur toute sa longueur à la courbe qu'il dessine un marchant. Le terme « droit » exprimant le fait que les postérieurs suivent les lignes tracées par les antérieurs.

(Cf. figure n°89)

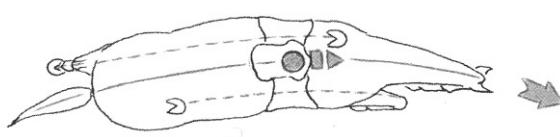


Figure n°89. Cheval qui marche « droit » sur un cercle.

Les postérieurs suivent la ligne tracée par les antérieurs

(Manuel officiel de préparation aux brevets fédéraux. *Etre cavalier galops 5, 6 et 7*. Edition Lavauzelle, 1995.)

Les muscles qui peuvent intervenir dans la latéro-flexion sont nombreux. En effet, tous les muscles pairs peuvent en principe participer à ployer le corps grâce à une contraction concentrique unilatérale. Cependant, les possibilités d'incurvation ne dépendent pas uniquement du raccourcissement musculaire du côté de la concavité mais aussi de la souplesse et des capacités d'étirement des muscles contro-latéraux.

De plus, la justesse d'exécution d'un exercice ne dépend pas uniquement de la trajectoire mais aussi que la qualité de la locomotion et par conséquent de l'impulsion.

D'après l'expérience du cavalier, l'engagement du membre postérieur interne semble être le facteur le plus déterminant sur la qualité de l'impulsion lors de l'incurvation.

En effet, pour que sa trajectoire soit alignée sur celle de l'antérieur, la phase de protraction du postérieur interne, doit comprendre une adduction et une rotation externe plus prononcées qu'en ligne droite.

(Cf. figure n°90)

Ainsi, lorsqu'un cheval est incurvé, un manque d'engagement se traduit au niveau du postérieur interne par une phase de protraction réduite mais aussi par un mouvement d'adduction et de rotation externe insuffisant voir même absent.

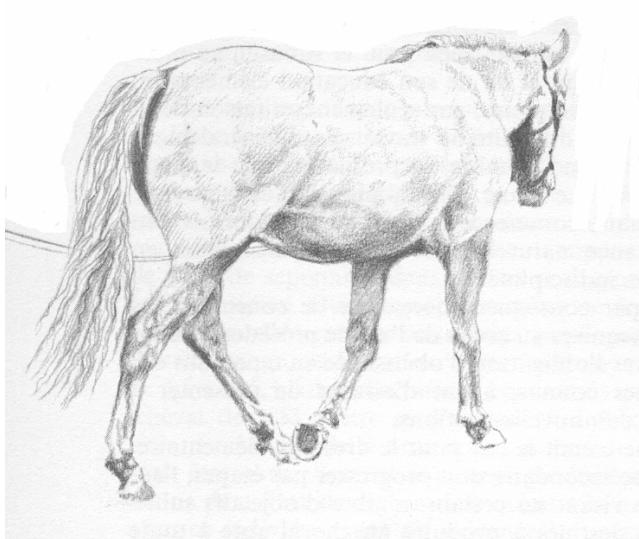


Figure n°90. Cheval incurvé à gauche

Adduction et rotation externe du postérieur interne lors de la protraction.
(dessin extrait du livre *le monde fascinant des chevaux* édition Gründ, 1977)

Par ailleurs l'analyse cinématique des mouvements vertébraux au pas, a montré que la colonne thoraco-lombaire réalise une latéro-flexion dont la concavité se trouve du côté du membre postérieur en phase de protraction. Au trot, on retrouve un phénomène quasiment similaire, sauf qu'à cette allure la colonne est alors moins contrainte car elle n'a pas atteint une position extrême à la fin de la protraction du membre. Au galop, les résultats ne sont pas assez précis pour supporter cette hypothèse.

[Cf. 2^{ième} partie, § 3312] et (Cf. figure n°91)

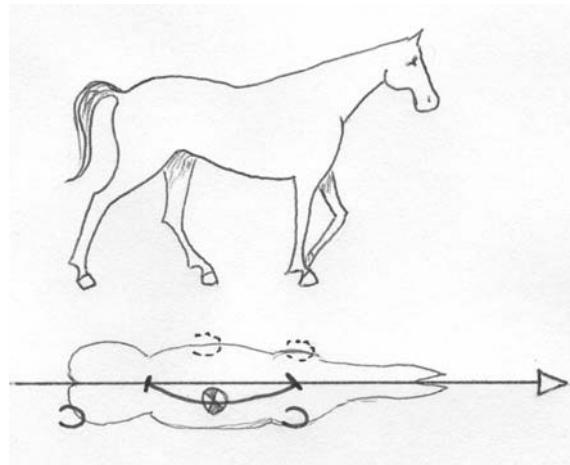


Figure n°91. Latéro-flexion de la colonne thoraco-lombaire, lors du 1^{er} temps d'une foulée de pas.

D'après les études sur la cinématique vertébrale in vivo.

Au pas, la latéro-flexion de la colonne thoraco-lombaire atteint un maximum à la fin de la phase de protraction du membre postérieur.

[Cf. 2^{ième} partie, § 33122]

Par conséquent au pas, lorsque le cheval est incurvé sa colonne thoraco-lombaire subit un maximum de latéro-flexion à la fin de la phase de protraction du membre postérieur interne. On peut alors penser que les muscles qui participent à cette action sont alors d'avantage sollicités.

Cette observation peut en partie expliquer la difficulté relative ressentie par le cavalier pour l'engagement du membre postérieur interne lorsque son cheval est incurvé.

232. INTERET DE L'INCURVATION POUR LA MISE SUR LA MAIN

En pratique, la mise sur la main et l'incurvation sont très fréquemment associées et ceci de façon très précoce aussi bien dans le travail du cheval que dans l'apprentissage du cavalier.

En effet, la manière la plus utilisée pour mettre un cheval sur la main est le travail sur des cercles. L'exercice consiste alors à « faire céder le cheval du côté où il est incurvé » puis de réaliser le même travail à main opposée. Au fur et à mesure l'attitude se stabilise sur les deux mains. Il devient alors possible pour le couple d'aborder la ligne droite en conservant la mise sur la main.

Pour incurver son cheval, le cavalier dispose des aides suivantes :

- ⇒ **Le poids du corps** reste au milieu du cheval
- ⇒ **La main intérieure** indique la direction sans tirer
- ⇒ **La main extérieure** contrôle le mouvement et l'impulsion, limite le fléchissement de l'encolure et maintient les épaules sur le tracé.
- ⇒ **La jambe intérieure** au centre (à la sangle) incurve le rachis et entretien l'impulsion (en contrôlant notamment l'engagement du postérieur interne)
- ⇒ **La jambe extérieure** légèrement reculée (derrière la sangle) maintient les hanches sur la courbe.

Le cavalier doit d'une part contrôler la trajectoire et d'autre part veiller à ce que sa monture conserve une impulsion suffisante. Comme nous venons de le voir, il doit donc pour cela faire en sorte que le postérieur interne soit bien engagé.

Ainsi, si sa monture est correctement incurvée elle réalise donc au moment de la phase de protraction du postérieur interne un effort musculaire lui permettant de réaliser en même temps :

- ⇒ **La flexion lombo-sacrale** nécessaire à la protraction.
- ⇒ **Le mouvement de rotation externe et d'adduction** lui permettant d'aligner la trajectoire sur celle du membre antérieur.
- ⇒ **La latéro-flexion de sa colonne thoraco-lombaire**, qui nous l'avons vu peut alors être beaucoup plus importante qu'en ligne droite.

Or, la contraction concentrique des **muscles de la paroi ventrale de l'abdomen** sont en mesure de répondre à l'ensemble de ces mouvements.

[Cf. 1^{ière} partie, § 423.]

On peut donc penser que dans l'incurvation, le cavalier peut trouver une aide lui permettant d'obtenir plus facilement la mise sur la main de sa monture grâce à la sollicitation plus importante des muscles abdominaux du côté de la concavité de la courbe.

Nous arrêtons cette analyse à ce stade car nous pensons qu'elle répond à l'objectif de cette partie et montre ainsi que l'approche sensorielle du cavalier peut être compatible avec les résultats et les hypothèses des études biomécaniques les plus récentes.

CONCLUSION

Les cavaliers et leurs maîtres se sont toujours intéressés à l'approche « scientifique » de leur art. Néanmoins, un cavalier de génie n'a jamais eu besoin de la science pour exploiter correctement sa monture. C'est par ailleurs uniquement grâce à l'utilisation de son ressenti et l'écoute de ses sensations qu'il peut trouver la voie de l'équilibre et d'une « logique équestre ».

Cependant les médecins ont désormais leur place au côté des sportifs. En effet, l'avancée récente des connaissances dans des domaines comme la physiologie et la biomécanique permet une évolution constante de la performance et aussi de la qualité de la carrière des sportifs.

Chez l'être humain, un travail en étroite collaboration entre sportifs et scientifiques permet déjà d'aboutir à :

- ⇒ L'analyse des gestes sportifs et à la détection des incohérences de travail quand elles existent.
- ⇒ Une meilleure compréhension de la mise en place de certaines pathologies directement liées à la pratique d'une activité sportive et donc de proposer à la fois une meilleure prévention, un diagnostic plus précoce et une rééducation plus adaptée.

Dans le domaine des sciences vétérinaires, la médecine sportive est moins développée. Il semble même que l'évolution des connaissances en recherche fondamentale ne profite guère à cette discipline. En effet, les progrès technologiques réalisés ces trois dernières décennies, donnent aujourd'hui accès à un nombre de données très important. A un tel point que l'on peut avoir l'impression que l'essentiel est parfois noyé sous une masse d'informations que la réflexion scientifique seule n'arrive pas forcément à relier entre elles. En ce qui concerne les sports équestres, il semble évident que l'approche sensorielle du cavalier peut s'avérer une source importante d'inspiration et ainsi en partie orienter la recherche.

Il apparaît donc nécessaire que les cavaliers et les scientifiques rétablissent la tradition de leur collaboration qui s'est peu à peu perdue au fil du siècle dernier, pour enfin voir naître une médecine réellement au service de ce si noble et dévoué sportif qu'est le cheval.

BIBLIOGRAPHIE

AUDIGIE F., POURCELOT P., DEGUEURCE C., DENOIX J-M, GEIGER D. et BORTULUSSI C. (1998). Asymmetry in placement of bilateral skin marker placement on kinematic variables. *AJVR* 59 (8), 938-944.

AUDIGIE F., POURCELOT P. ,DEGUEURCE C. , DENOIX J-M et GEIGER D. (1999) Kinematics of the equine back : flexion-extension movements in sound trotting horses. *Equine vet. J., suppl.* 30, 210-213.

BARONE R. (1999). *Anatomie comparée des mammifères domestiques. Tome 1 : Osteologie.* 4^{ème} ed. Paris, Vigot. 761p

BARONE R. (1999) *Anatomie comparée des mammifères domestiques. Tome 2 : arthrologie et myologie.* 4^{ème} ed. Paris, Vigot. 1021p

BOUISSET S. (2002). *Abrégés. Biomécanique et physiologie du mouvement.* Paris, Masson, 2002. 304p

BUCHNER H., SALELBERG H., SCHAMHARDT H. et BARNEVELD A. (1996). Limb movement adaptations in horses with experimentally induced fore or hindlimb lameness. *Equine vet. J.* 28 (1) 63-70.

CLAYTON H.M., et TOWNSEND H.G. (1989). Kinematics of the cervical spine of the adult horse. *Equine Vet. J.* 21 (3), 189-192.

DALIN G. et JEFFCOTT L.B. (1986) Sacro iliac joint of the horse 1. gross morphology. *Anat. Histo. Embryol.* 15, 80-94.

DEGUEURCE C. (1995). *Analyse cinématique du trot du cheval sur terrain ferme.* Thèse Doc. , université Paris sud.

DEGUEURCE C., CHATEAU H. et DENOIX J.M. (2005). In vitro assessment of the movements of the sacroiliac joint in the horse. *Equine Vet. J.* (Sous presse)

DELAVENNA V. (2003). *Les mors et enrênement : mode d'action, utilisation, application à la biomécanique et au travail du cheval.* Thèse Méd. Vét., ENV Lyon, N°60.

DENOIX J.M. (1986). Biomécanique de la colonne vertébrale : acquisitions récentes. *In proceedings of the 12 journée d'études, CEREOPA, Paris.* 88- 106

DENOIX J.M. (1987). Kinematic of the thoracolumbar spine of the horse during dorsoventral movements: a preliminary report. In *proceedings of 2 international conference on equine exercice physiologie*, San Diego. 607-614.

DENOIX J.M. (1988). Biomécanique et travail physique du cheval. *L'éperon information hippique*. Numéro hors série.

DENOIX J.M. (1992a). Aspects fonctionnels des régions lombo sacrale et sacro iliaque du cheval. *P.V.E.* **24** (1), 13-21.

DENOIX J.M. (1992b). Approche sémiologique des régions lombo sacrale et sacro iliaque chez le cheval. *P.V.E.* **24** (1), 23-38.

DENOIX J.M. (1999a). Spinal biomechanics and functionnal anatomy. *Veterinary clinics of north america : equine practice*, **15** (1), 27-60.

DENOIX J.M. (1999c) Rappels anatomiques et bases biomécaniques. *EPU pathologie du dos chez le cheval*, ENV Alfort.

DENOIX J.M. et PAILLOUX J.P. (2001a) *Approche de la kinésithérapie du cheval*. 2^{nde} ed. Paris, Maloine. 291p

DENOIX J.M. et AUDIGIE F. (2001b). *The neck and the back*. In Equine locomotion - Back et Clayton, W.B. Saunders. 167-171.

DREVEMO S., DALIN G., FREDERICSON I. et HJERTEN G. (1980a) Equine locomotion : 1. The analysis of linear and temporal stride characteristics of trotting Standardbreds. *Equine Vet. J.* **12** (2), 60-65.

DREVEMO S., DALIN G., FREDERICSON I. et BJÖRNE K. (1980b) Equine locomotion : 3. The reproducibility of gait in Standardbreds trotters. *Equine Vet. J.* **12** (2), 71-73.

FABER M., SHAMHARDT H., WEEREN R., JOHNSTON C., ROEPSTORFF L., BARNEVELD A. (2000) Basic three-dimensional kinematics of the vertebral column of horses walking on a treadmill. *AJVR* **61** (4), 399-406.

FABER M., SHAMHARDT H., WEEREN R., JOHNSTON C., ROEPSTORFF L., BARNEVELD A. (2001a) Basic three-dimensional kinematics of the vertebral column of horses trotting on a treadmill. *AJVR* **62** (5), 757-764

FABER M., JOHNSTON C., SCHAMHARDT H.C., Van WEEREN P.R., ROEPSTORFF L. et BARNEVELD A. (2001b) Three dimensional kinematics of the equine spine during canter. *Equine Vet. J.* **33**, 145-149.

FABER M., SCHAMHARDT H., Van WEEREN P. R. et BARNEVELD A. (2001c). Methodology and validity of assessing kinematics of the thoracolumbar vertebral column in horses on the basis of skin-fixated. *AJVR* **62** (3), 301-306.

FABER M., JOHNSTON C., Van WEEREN P.R. et BARNEVELD A. (2002) Repeatability of back kinematics in horses during treadmill locomotion. *Equine Vet. J.* **34** (3), 235-241.

FREDRICSON I., DREVEMO S., DALIN G., HJERTEN G. et BJÖRNE K. (1980) The application of high-speed cinematography for the quantitative analysis of equine locomotion. *Equine Vet. J.* **12** (2), 54-59.

FREDRICSON I., DREVEMO S., DALIN G., HJERTEN G., BJÖRNE K. et RYNDE R. (1983) Treadmill for equine locomotion analysis. *Equine Vet. J.* **15** (2), 111-115.

GELLMAN K. et BERTRAM J. (2002a). The equine nuchal ligament 1: structural and material properties. *Vet. Comp. Orthop. Traumatol.* **15**, 1-6.

GELLMAN K. et BERTRAM J. (2002b). The equine nuchal ligament 2 : passive dynamic energy exchange in locomotion. *Vet. Comp. Orthop. Traumatol.* **15**, 7-14.

HAUSSLER K.K. (1999a). Anatomy of the thoracolumbar vertebral region. *Veterinary clinics of north america : equine practice.* **15** (1), 13-26.

HAUSSLER K.K., STOVER S.M. et WILLITS N.H. (1997) Developmental variation in lumbosacropelvic anatomy of thoroughbred racehorses. *AJVR* **58** (10), 1083-1091.

HAUSSLER K.K., STOVER S.M. et WILLITS N.H. (1999b) pathologic changes in the lombo sacral vertebrae and pelvis in thoroughbred racehorses. *AJVR*, **60** (2), 143-153.

HAUSSLER K.K. . BERTRAM J., GELLMAN K. et HERMANSON J. (2001). Segmental in vivo vertebral kinematics at the walk, trot and canter: a preliminary report. *Equine Vet. J., Suppl.* **33**, 160-164.

JANSEN M., van RAAIJ J., van den BOGERT A., SCHAMHARDT H. et HARTMAN W. (1992). Quantitative analysis of computer-averaged electromyographic profiles of intrinsic limb muscles in ponies at the walk. *AJVR*, **53** (12), 2343-2349.

JEFFCOTT L.B. et DALIN G. (1980a) Natural rigidity of the horse's backbone. . *Equine vet. J.* **12**, 101-108.

JEFFCOTT L.B., DALIN G., STINA EKMAN et OLSSON S.E. (1985) Sacroiliaic lesions as a cause of chronic poor performance in competitive horses. *Equine Vet. J.* **17** (2) 111-118.

LICKA T. et PEHAM C. (1998). An objective method for evaluating the flexibility of the back of standing horses. *Equine vet. J.* **30** (5), 412-415.

LICKA T., PEHAM C. et ZOHMANN E. (2001a). Treadmill study of the range of back movement at the walk in horses without back pain. *AJVR* **62** (7), 1173-1179.

LICKA T., PEHAM C. et ZOHMANN E. (2001b) . Range of back movement at trot in horses without back pain. *Equine Vet. J., Suppl.* **33**, 150-153.

Commission formation de la F.E.E. (1988). *Manuel officiel de préparation aux examens fédéraux d'équitation. Tome 2. les examens d'argent.* Lavauzelle, Paris. 147p

MALEN C. et JACQUEY L. (1995). *Manuel officiel de préparation aux brevets fédéraux. Etre cavalier galops 5, 6 et 7.* Lavauzelle, Paris. 127p

MEERSHOEK L. et van den BOGERT A. (2001). *Mechanical analysis of locomotion.* In Equine locomotion - Back et Clayton, W.B. Saunders. 305-326.

MERKENS H., SCHAMHARDT H., HARTMAN W. et KERSJES A. (1985). Ground reaction force pattern of dutch warmblood horses at normal walk. *Equine vet. J.* **18** (3), 207-214.

MERKENS H., SCHAMHARDT H., GEERTRUDA J., van OSCH et van den BOGERT A. (1993a). Ground reaction force patterns of dutch warmblood horses at normal trot. *Equine vet. J.* **25** (2), 134-137.

MERKENS H., SCHAMHARDT H., GEERTRUDA J., van OSCH et HARTMAN W. (1993b). Ground reaction force patterns of dutch warmblood horses at the canter. *AJVR* **54** (5), 670-674.

POURCELOT P., DEGUEURCE C., AUDIGIE F. et DENOIX J.M. (1996). Analyse cinématique tridimensionnelle de la locomotion du cheval : applications à la détection des troubles locomoteurs. 22^e journée d' étude- institut du cheval, 54-67.

POURCELOT P., AUDIGIE F., DEGUEURCE C., DENOIX J.M., GEIGER D. (1998) Kinematic of the equine back : a method to study the thoracolumbar flexion-extension movements at the trot. *Vet. Res.* **29**, 519-525.

ROBERT C. (2000). *Groupes et actions musculaires.* cours de DCEV1, ENV Alfort.

ROBERT C., VALETTE JP., DENOIX J.M. (1998) Surface electromyographic analysis of the normal horse locomotion : a preliminary report. *Proc. Conf. Equine Sports Med. And Science, Cordoba*, 80-85.

ROBERT C., VALETTE J.P., DEGUEURCE C., DENOIX J.M. (1999) Correlation between surface electromyography and kinematics of the hindlimb of trot on a treadmill. *Cells Tissues Organs*, **165**, 113-122.

ROBERT C., AUDIGIE F., VALETTE J.P., POURCELOT P. et DENOIX J.M. (2001). Effect of treadmill speed on the mechanics of the back in the trotting saddlehorse. *Equine Vet. J., Suppl.* **33**, 154-159.

ROONEY J.R. (1977) sacro-iliac arthrosis and "stifle lameness". *Mod. Vet. Pract.* **58**, 138-139.

ROONEY J. (1982). The horse' s back : biomechanics of lamaness. *Equine practice*. **4** (2), 17-27.

STECHER R. (1962). Lateral facets and lateral joints in the lumbar spine of the horse- a descriptive and statistical study. *Am. J. Vet. Res.* **23** (96), 939-947.

STECHER R. et GOSS L. (1961). Ankylosing lesions of the spine of the horse. *J.A.V.M.A.* **138** (5), 248-255.

THUILLIEZ C. (2003). *Le cheval de dressage : approche biomécanique et performances*. Thèse Méd. Vét., ENV Alfort N°97.

TOKURIKI M., AOKI O., NIKI Y., KURAKAWA Y., HATAYA M., KITA T. (1989) Electromyographic activity of cubital joint muscles in horses during locomotion. *Am. J. Vet. Res.* **50** (6) 950-957.

TOKURIKI M., OHTSUKI R., KAI M., HIRAGA A., OKI H., MIYAHARA Y. et AOKI O. (1999). EMG activity of the muscles of the neck and forelimbs during different forms of locomotion. *Equine vet. J., Suppl.* **30**, 231-234.

TOWNSEND H.G.G., LEACH D.H., FRETZ P.B. (1983) Kinematics of the equine thoracolumbar spine. *Equine vet; J.* **15**, 117-122

TOWNSEND H.G.G., LEACH D.H. (1984) Relationship between intervertebral joint morphology and mobility in the equine thoracolumbar spine. *Equine vet; J.* **16**, 461-465.

TOWNSEND H.G.G., LEACH D.H. (1986) relationship between spinal biomechanics and pathological changes in the equine thoracolumbar spine. *Equine vet; J.* **18**, 107-112.