

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	3
CHAPITRE I : MATERIEL ET METHODES	5
<u>A/ Les chevaux</u>	7
1/ <i>Choix des chevaux</i>	7
2/ <i>Préparation des chevaux</i>	7
<u>B/ Protocole d'enregistrement</u>	10
1/ <i>Préparation de l'aire d'enregistrement</i>	10
2/ <i>Réalisation des enregistrements</i>	13
<u>C/ Dépouillement des enregistrements</u>	13
<u>D/ Reconstruction 3D des mouvements</u>	14
<u>E/ Analyse des mouvements</u>	14
<u>F/ Analyse statistique des données</u>	22
<u>G/ Précision des mesures</u>	22
CHAPITRE II : RESULTATS	25
<u>A/ Précision des mesures</u>	27
<u>B/ Description globale du mouvement d'un cheval au galop</u>	28
<u>C/ Description de mouvements particuliers</u>	33
1/ <i>La vitesse du cheval</i>	33
2/ <i>Les mouvements pendulaires des membres</i>	34
2.1/ <i>Les mouvements pendulaires de l'antérieur droit</i>	34
2.2/ <i>Les mouvements pendulaires du postérieur droit</i>	36
3/ <i>Les mouvements de la tête et de l'encolure</i>	39

3.1/ Les mouvements verticaux de la tête	40
3.2/ Les mouvements de balancier de la tête et de l'encolure	42
4/ <i>Les mouvements du tronc</i>	43
4.1/ Les mouvements verticaux du thorax	44
4.2/ Les mouvements de balancier du tronc	45
CHAPITRE III : DISCUSSION	49
<u>A/ Le protocole : ses points forts et ses limites</u>	51
1/ <i>Précision des mesures</i>	51
2/ <i>Le nombre de passages</i>	52
3/ <i>Le côté gauche du cheval</i>	52
4/ <i>La position des marqueurs</i>	55
5/ <i>Les paramètres étudiés</i>	56
6/ <i>Simplification des enregistrements</i>	57
<u>B/ Les résultats : interprétation et intérêts</u>	58
1/ <i>Le galop sur le cercle</i>	58
2/ <i>Le cheval de voltige</i>	58
3/ <i>Les critères de jugement</i>	59
CONCLUSION	63
BIBLIOGRAPHIE	

INTRODUCTION

La voltige équestre est une discipline sportive en pleine évolution. Depuis peu en compétition, la locomotion du cheval de voltige fait partie des critères jugés. Mais les éléments à observer sont trop subjectifs et mal définis car difficilement descriptibles. Ils ne reposent pas sur des bases solides de connaissance car la locomotion du cheval de voltige n'a jusqu'à présent fait l'objet d'aucune étude sérieuse. L'entraîneur de l'Equipe de France de Voltige, Monsieur Pinel, a donc souhaité obtenir une telle étude. A partir des données récoltées, des critères de jugement pourront ainsi être définis et appliqués en compétition. En effet, la cinématique fournit des informations très spécifiques, d'ordre qualitatif et quantitatif sur la locomotion. Elle permet de reconstruire de façon informatique les mouvements dans l'espace. Ainsi, les différents segments corporels du sujet peuvent être reconstitués et chaque région du corps peut alors être étudiée séparément.

Etant donné l'enjeu économique que représente le cheval de sport, de nombreuses études ont été menées sur la description de la locomotion normale du cheval (Muybridge, 1887; Marey, 1873 ; Hildebrand, 1965 ; Leach, 1987 ; Leach et Ormrod, 1984 ; Van Den Bogert *et al.*, 1994), surtout depuis les trente dernières années. D'autres travaux portent sur la locomotion anormale (Clayton, 1986; Buchner *et al.*, 1993,1995 et 1996 ; Deuel *et al.*, 1995 ; Peham *et al.*, 1996 ; Pourcelot *et al.*, 1996 ; Galisteo *et al.*, 1997), les boiteries étant la première cause de réforme chez le cheval (Jeffcott *et al.*, 1982 ; Rossdale *et al.*, 1985).

D'et al., Jr(J observ la 0.0006 Tc -00.0013 Tw 12 0 0 12 127.62021 365.6009Tj/Tn12 0 0 j12 oMuyb

Même si l'objectif premier était de décrire les mouvements du cheval de voltige, d'autres intérêts s'y sont greffés. En effet, il est nécessaire avant tout de déterminer la faisabilité d'une telle étude. Une étude cinématique d'un cheval au galop sur un cercle soulève certains problèmes méthodologiques que se soit lors de l'enregistrement ou lors de l'analyse informatique des données.

Certaines difficultés sont dues à la nature de l'animal étudié. La grande taille de ce dernier implique la mise en place d'un système adapté, plus lourd que s'il s'agissait de chiens ou d'humains. Son caractère peureux et les réactions dangereuses qui peuvent en découler font que le système doit être discret et sans danger pour l'animal lui-même ou pour les hommes autour.

D'autres problèmes sont liés au fait que l'animal soit au galop sur un cercle, dans ses conditions habituelles de travail. Le champ d'enregistrement est donc plus grand. Il n'est plus linéaire. Le sol est meuble et le cheval est enrêné. Le protocole utilisé habituellement par l'Equipe Associée INRA – ENVA - Biomécanique du cheval qui avait été développé pour l'analyse cinématique 3D des allures du cheval, appelé système E.K.A.S. (Pourcelot et al., 1997), a donc dû être adapté. Est il toujours valide et interprétable?

D'autre part, l'objectif premier de cette étude était de décrire la locomotion du cheval de voltige dans ses conditions d'utilisation. Pour cela, un certain nombre de paramètres ont été sélectionnés pour être analysés. Ils ont été retenus pour leur importance dans la compréhension des mouvements du cheval de voltige. Le premier est la vitesse. Elle présente un intérêt car elle intervient dans la maniabilité du cheval pour le voltigeur et pour le longeur. Ensuite, les mouvements pendulaires des membres ont été observés. Enfin, la connaissance des mouvements de la tête et de l'encolure et de ceux du thorax permettent de comprendre les mouvements de balancier du cheval, mouvements qui fournissent l'énergie au cavalier, appelé « rebond », pour qu'il exécute ses figures.

A la suite de cette étude, des critères de jugement du cheval ont pu être définis pour améliorer l'objectivité de la notation du cheval en compétition, critères facilement appréciables et observables.

CHAPITRE I :
MATERIEL ET METHODES

Rapport-Gratuit.com

A/ LES CHEVAUX

1/ Choix des chevaux

Cette étude a été menée sur neuf chevaux adultes appartenant à l' Ecurie de l' Equipe de France de Voltige. Leurs caractéristiques sont résumées dans le tableau 1, ci-dessous.

NOM	RACE	AGE (ans)	SEXE	HAUTEUR AU GARROT (m)	NIVEAU DE COMPETITION
Banco	SF	12	H	1,73	International
Beauty	SF	12	H	1,78	Régional
Diamos	Hannovrien	11	H	1,83	International
Egine	SF	9	F	1,71	Régional
Papaz	SF	20	H	1,73	Régional
Quitus	SF	19	H	1,76	International
Saphir	SF	17	H	1,75	National
Taxy	SF	16	H	1,78	International
Turco	SF	16	H	1,78	Régional

(SF: Selle-Français, H: hongre, F: femelle).

Tableau 1: Caractéristiques des chevaux étudiés.

Tous les chevaux étaient à l'entraînement, donc en condition.

2/ Préparation des chevaux

Pour la séance d'enregistrement, chaque cheval a été préparé comme pour un

entraînement classique: avec un arçon, un tapis sur son dos et un enrènement de voltige lui fixant la tête, comme le montre la figure 1.

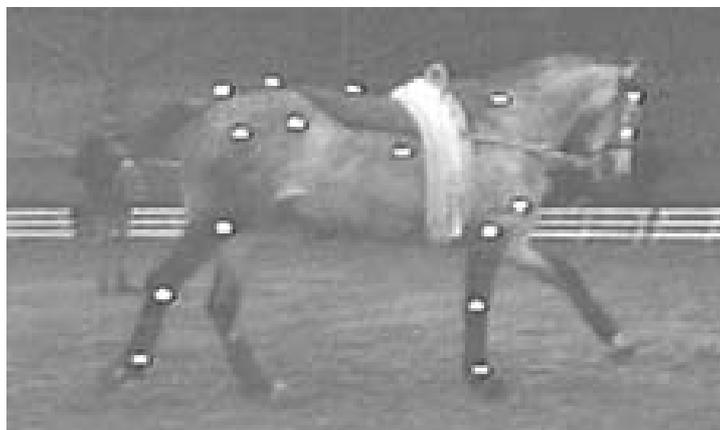


Figure 1 : Harnachement du cheval.

Par ailleurs, seize marqueurs cutanés ont été positionnés très précisément sur l'animal, en regard de repères anatomiques déterminés, visibles sur la figure 1. Lors de cette étape, le cheval était immobile et mis au placet, pour que la position soit identique entre les différents individus.

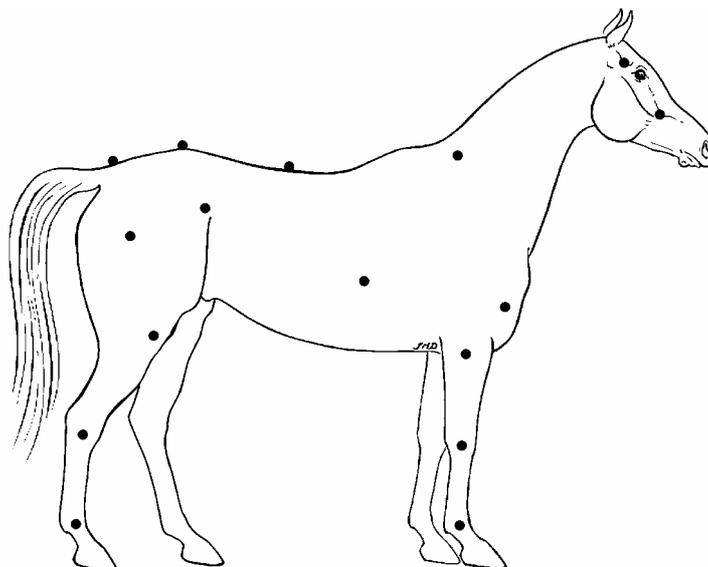


Figure 2: Position des marqueurs

Tous les marqueurs étaient placés du côté droit de l'animal, seul côté filmé par les caméras.

Le positionnement des marqueurs s'est fait selon des schémas établis, décrits dans la littérature (Degueurce *et al.*, 1997; Pourcelot *et al.*, 1996). Mais certaines adaptations ont parfois été nécessaires pour répondre aux besoins de cette étude.

Cinq étaient positionnés sur le postérieur: sur le tuber coxae, le grand trochanter du fémur, la tubérosité tibiale, la face latérale du talus et le centre du condyle métatarsien.

Quatre marqueurs étaient placés sur l'antérieur: sur la partie caudale du tubercule majeur de l'humérus, l'épicondyle latéral de l'humérus, le milieu du ligament collatéral latéral du carpe et le centre du condyle métacarpien.

Deux marqueurs étaient positionnés sur la tête: le premier sur l'os temporal et le second juste dorsalement à la partie distale de la crête faciale.

Quatre points caractéristiques de la ligne du dos du cheval étaient repérés chacun par un marqueur: un au niveau du pli de l'encolure, d'autres en regard de la jonction thoracolumbaire, du tuber sacrale et de la jonction sacro-caudale. En raison de l'inclinaison du tronc du cheval vers le centre du cercle au galop, ces quatre marqueurs n'étaient pas placés dans le plan médian du cheval mais légèrement à droite de ce plan médian.

Une approximation des mouvements du centre de gravité de l'animal a été obtenu en plaçant un dernier marqueur juste derrière le passage de sangle, à mi-hauteur du thorax.

Ces marqueurs étaient placés sur la peau non tondu à l'aide d'un adhésif double face.

Chaque marqueur était formé d'une demi sphère de trois centimètres de diamètre, recouverte d'un film rétro réfléchissant (Scotchlite 3M 7610 HIPS). Ce film possède un pouvoir réfléchissant mille fois supérieur à celui d'un papier blanc et assure la réflexion de la lumière selon la direction du rayon lumineux incident.

B/ PROTOCOLE D'ENREGISTREMENT

Pour réaliser cette étude, le système devait répondre à un certain nombre d'exigences.

Il devait fournir :

- des données cinématiques en trois dimensions,
- d'un cheval au galop,
- sur un cercle,
- avec une précision de mesure satisfaisante,
- à partir d'un champ d'enregistrement correspondant à une foulée de galop,
- et ceci à moindre coût.

Un système d'analyse cinématique performant répondait partiellement à ces besoins, celui développé à l'ENVA par l'équipe associée INRA-ENVA-Biomécanique du cheval, et appelé EKAS. Il a donc été utilisé. Néanmoins, quelques adaptations ont été nécessaires.

Le protocole d'obtention des données cinématiques 3D est développé ci-après. Il peut être divisé en deux phases. La première correspond à l'enregistrement sur le terrain et la seconde à l'analyse informatique qui aboutit à la reconstruction 3D des mouvements des chevaux.

1/ Préparation de l'aire d'enregistrement :

Les enregistrements ont été réalisés au CEZ de Rambouillet lors d'un stage « Haut niveau de longéage ».

Le cercle de voltige correspondait à une piste circulaire en sable de vingt mètres de diamètre, sous un manège, sur laquelle un cheval pouvait être longé au galop. Sur un même hémicercle, deux caméscopes Sony Hi 8 mm FX700E (50 hertz) étaient disposés symétriquement par rapport au longeur situé au centre du cercle et formant un angle de 60° entre eux (figure 3).

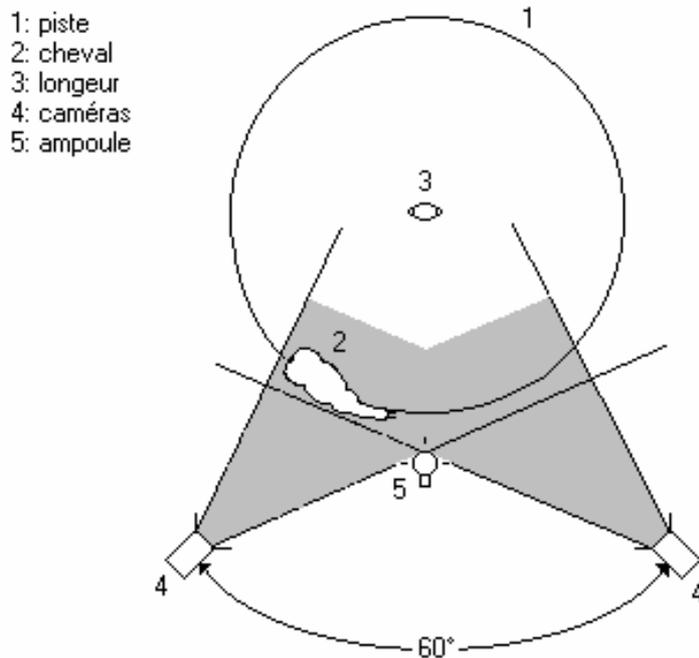


Figure 3: Aire d'enregistrement.

Chaque caméscope était monté sur un pied photographique (SLIK 505 QF), le plaçant à une hauteur d'un mètre. Il était entouré par quatre projecteurs halogènes de 500 watts servant à augmenter la luminosité des marqueurs réfléchissants disposés sur les chevaux.

Une ampoule électrique était placée à hauteur de la zone d'enregistrement. Elle était allumée à chaque passage du cheval pour permettre une synchronisation temporelle des deux caméras.

Avant de commencer la séance d'enregistrement, une structure de calibration de 7,5 mètres de long, 1,8 mètres de large et 2 mètres de haut, munie de 36 marqueurs réfléchissants (Scotchlight 3M 7610 HIPS) de coordonnées spatiales connues (voir la figure 4) a été disposée au centre du champ. Cette structure donnait les valeurs de référence pour la reconstruction 3D des mouvements du cheval.

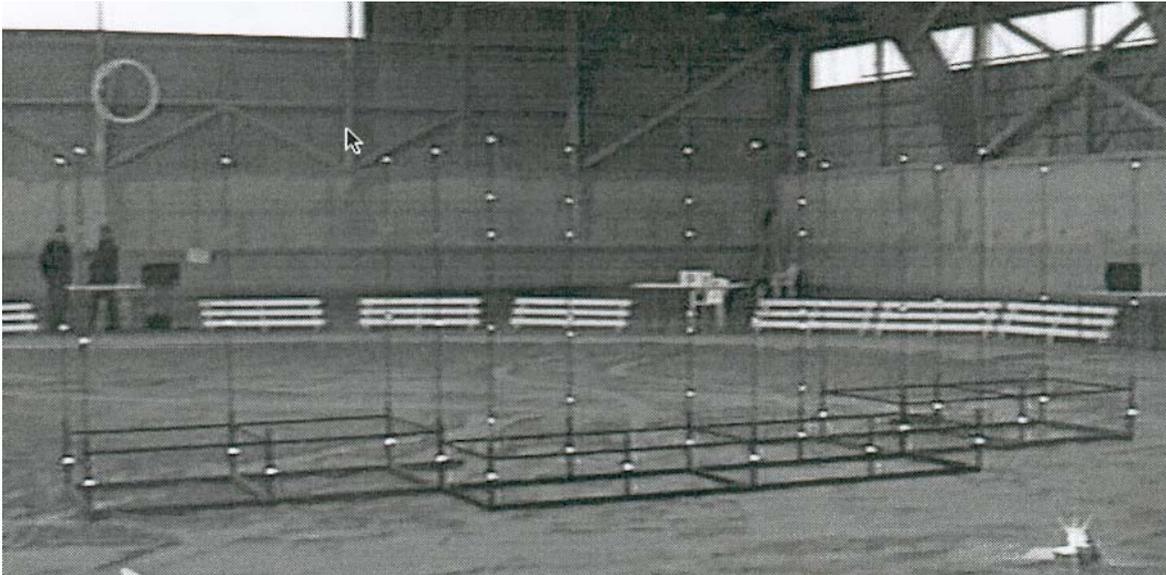


Figure 4 : Structure de calibration.

Les caméras ont été réglées l'une après l'autre de la manière suivante :

- ses projecteurs ont été allumés ;
- son champ d'enregistrement a été ajusté aux marges de la structure ;
- l'autofocus a été débrayé et la mise au point a été effectuée manuellement sur le centre de la structure ;
- la vitesse d'obturation a été fixée à 1/2000 ième de seconde ;
- l'ouverture du diaphragme et le gain de l'image ont été réglés pour obtenir le meilleur contraste possible entre les marqueurs de la structure et le reste de l'environnement.

Après avoir effectué ces réglages, la structure a été filmée quelques secondes par la caméra.

Les mêmes réglages ont été entrepris pour le deuxième caméscope puis la structure de calibration a été retirée.

2/ Réalisation des enregistrements :

Le cheval était ensuite amené sur la piste à laquelle il était habitué aux différentes allures. Il était longé à main gauche, sens dans lequel les compétitions internationales s'effectuent.

Lorsque le cheval était suffisamment concentré et détendu, une dizaine de passages successifs étaient filmés. Les cinq passages les plus réguliers ont été retenus pour être analysés c'est à dire ceux pour lesquels l'allure était la plus constante possible et aucun mouvement parasite n'était observé (mouvement de peur du cheval ou réaction à un mouvement du longeur).

C/ DEPOUILLEMENT DES ENREGISTREMENTS

Le traitement des enregistrements vidéos s'est effectué en différé au laboratoire de l'Equipe Associée INRA-ENVA-Biomécanique du Cheval, sur un ordinateur Macintosh Quadra 800.

Les séquences vidéos ont été numérisées à l'aide d'une carte de digitalisation ayant une résolution de 576*768 pixels pour 256 niveaux de gris.

Pour chaque caméra et pour chaque séquence vidéo, la détection de la position des marqueurs a été ensuite réalisée de façon semi-automatique grâce à un logiciel particulier, développé dans ce laboratoire (Pourcelot *et al.*, 1997). Après une phase d'initialisation manuelle de la positions des marqueurs, le logiciel repérait automatiquement la position des marqueurs sur les images suivantes par l'application d'un seuil de luminosité aux marqueurs (Taylor *et al.*, 1982). Ainsi, les pixels retenus pour définir le marqueur étaient ceux dont la luminosité était supérieure au seuil. Ce logiciel utilisait un seuil mobile ce qui permettait de détecter des marqueurs sur des enregistrements réalisés dans des conditions de luminosité très variées. C'est à dire qu'un seuil de luminosité était affecté à chaque marqueur et sa valeur était réajustée pour chaque image. Les coordonnées écrans (2D) attribuées à un marqueur étaient celles du barycentre de ses pixels pondéré par leurs niveaux de gris.

Pour chaque passage du cheval, chaque caméra fournit ainsi un fichier contenant les coordonnées écrans (2D) des positions successives des marqueurs du cheval.

D/ RECONSTRUCTION 3D DES MOUVEMENTS

A l'aide des paramètres de la calibration, les deux fichiers 2D correspondants à un passage ont conduit à l'obtention d'un nouveau fichier contenant les trajectoires tridimensionnelles des marqueurs. Cette reconstruction 3D a été effectuée par la méthode de la DLT (Direct Linear Transformation) (Abdel-Aziz et Karara, 1971) à l'aide des fichiers de la structure de calibration.

Les données obtenues étaient ensuite filtrées par la méthode des séries de Fourier (Capozzo *et al.*, 1975).

Un second logiciel spécialement développé par l'Equipe Associée INRA-ENVA Biomécanique du Cheval a servi à l'exploitation et l'analyse des données ainsi obtenues.

E/ ANALYSE DES MOUVEMENTS

Chaque cheval était filmé durant une dizaine de tours de piste. Les cinq passages les plus réguliers étaient analysés.

Pour chaque passage, dans le champ établi, seule une foulée complète de galop a pu être obtenue, comme le schématise la figure 5.

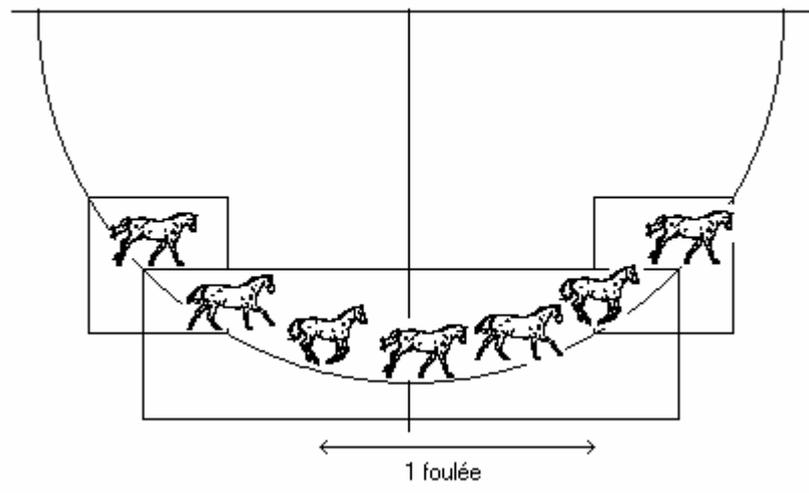
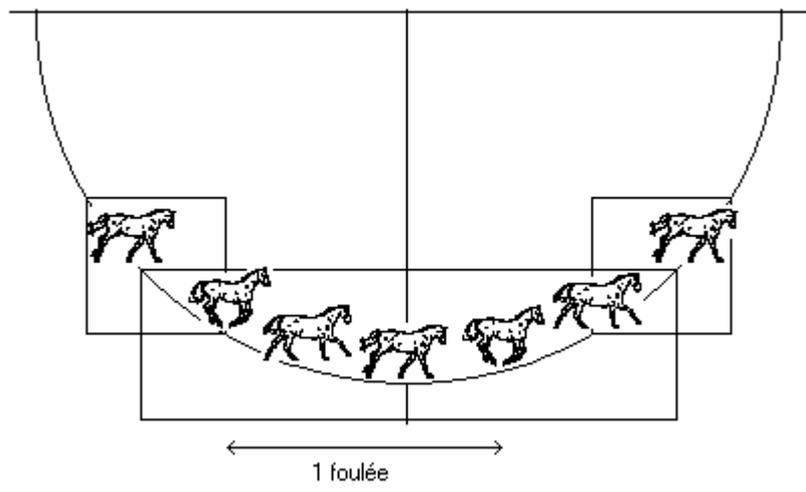
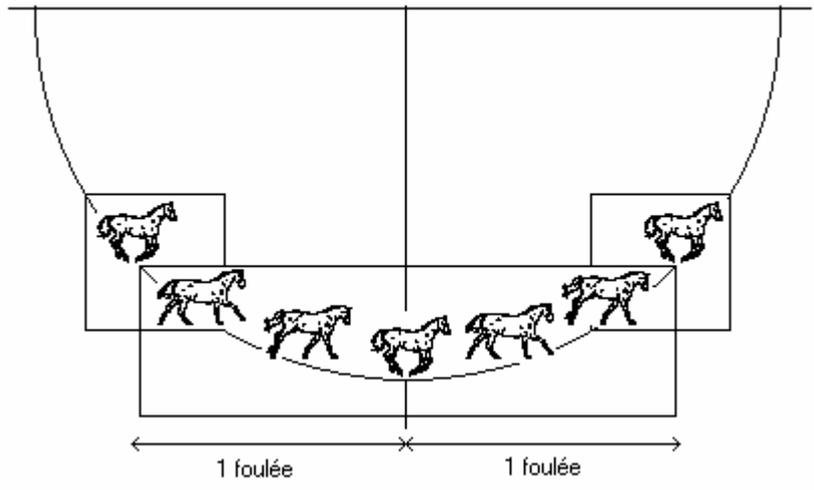


Figure 5 : Champ d'enregistrement.

Pour chaque cheval, cinq foulées ont donc été étudiées. Et sur l'ensemble des chevaux, quarante cinq foulées ont été reconstituées.

Mais pour les comparer, la détermination précise du début et de la fin de la foulée a été nécessaire.

Dans cette étude, la foulée de galop a été définie comme étant la période allant du poser du postérieur droit jusqu'au poser suivant de ce même membre. Le sol étant meuble, le moment exact du poser n'a pas pu être détecté comme couramment par le contact du sabot avec le sol. Il s'est fait par l'observation de la phase d'appui du membre. Lors de la mise en charge du membre, le boulet recule. La vitesse longitudinale du marqueur placé à ce niveau devient donc négative. L'image retenue comme étant la première de la foulée a donc été celle précédant l'image pour laquelle la vitesse horizontale du marqueur du boulet postérieur droit devenait négative.

De même, des critères ont été définis pour faire correspondre une image de l'enregistrement à chaque étape de la foulée. Par exemple, l'image retenue comme étant celle correspondant à l'instant du lever du membre était celle pour laquelle la vitesse horizontale du boulet devient supérieur à 20 ms.

D'autre part, la durée d'une foulée n'est pas constante d'un individu à l'autre et d'un passage à l'autre. Il était donc difficile de comparer les positions d'un même point entre différents passages car il n'était pas possible de se référer à un moment donné dans le temps. Par exemple, l'instant $T(0 + 400\text{ms})$ ne correspondait pas au même stade de la foulée entre deux passages différents. Chaque foulée a donc été ré-échantillonnée en cent points par interpolation linéaire. Ainsi, l'échelle de temps n'était plus graduée en milisecondes mais en pourcentage de la foulée. Par exemple, le second poser du postérieur droit se faisait à 100% de la foulée.

Grâce à ce calcul, il est devenu possible de moyenner les foulées.

A partir des images obtenues lors de la séance d'enregistrement, le mouvement global du cheval au galop sur un cercle a pu être analysé. Des kinogrammes ont été établis pour les membres droits, fournissant ainsi une vision d'ensemble de la trajectoire de tous les marqueurs d'un membre au cours d'une foulée.

L'analyse de différents paramètres a permis d'étudier en détail les mouvements du cheval. Ainsi pour chaque passage de chaque cheval, les paramètres suivants ont été observés:

- la vitesse du cheval,
- les mouvements pendulaires de l'antérieur droit,
- les mouvements pendulaires du postérieur droit,
- les mouvements verticaux de la tête,
- les mouvements de balancier du bloc tête - encolure,
- les mouvements verticaux du thorax,
- les mouvements de balancier du tronc.

L'analyse de ces paramètres a été réalisée par l'observation des déplacements de marqueurs déterminés, en fonction du temps.

Pour étudier la vitesse moyenne des chevaux lors d'un passage, le marqueur placé sur l'épaule de l'animal (figure 6) a été choisi. Ce marqueur étant fixé sur le tronc, la vitesse du cheval lors d'un passage a pu être évaluée en calculant la vitesse de déplacement (horizontal et transversal) du marqueur de l'épaule au cours d'un passage.

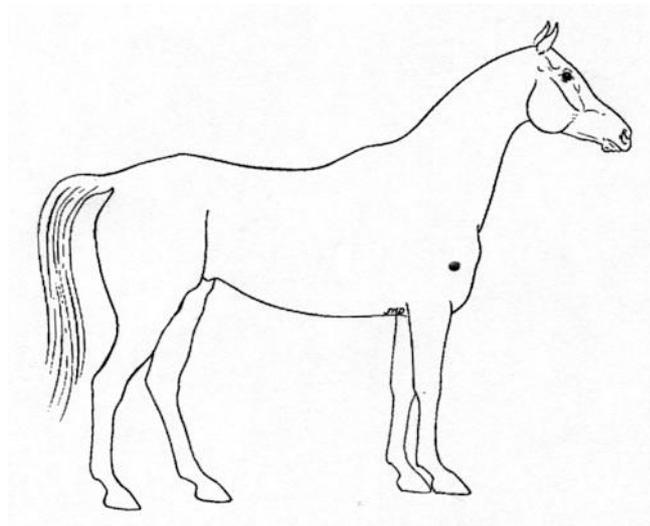


Figure 6: Mesure de la vitesse du cheval.

Les mouvements pendulaires de l'antérieur droit ont été décrits en calculant à chaque instant l'angle formé par l'axe pointe de l'épaule - boulet et l'axe vertical (figure 7).

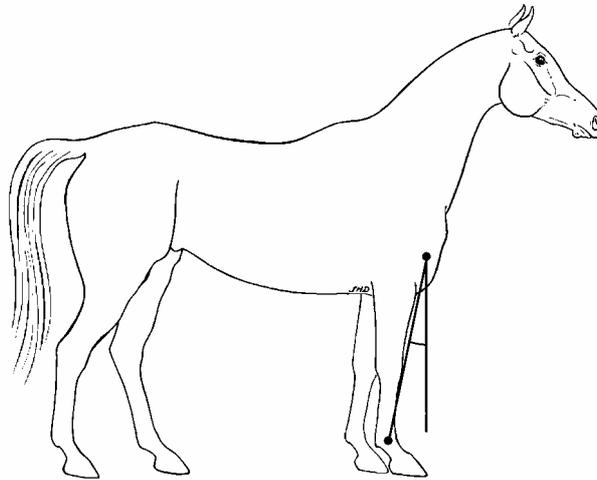


Figure 7: Mesure des mouvements pendulaires de l'antérieur droit.

Pour les mouvements pendulaires du postérieur droit, l'angle formé par l'axe angle de la hanche – boulet postérieur et par l'axe vertical a été calculé à chaque instant (figure 8). L'angle de la hanche était repéré par un marqueur placé sur le tuber coxae.

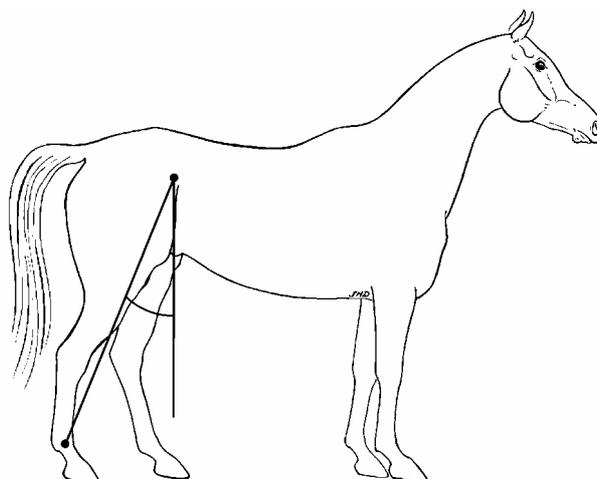


Figure 8: Mesure des mouvements pendulaires du postérieur droit.

Pour chaque foulée, l'amplitude du mouvement pendulaire de l'antérieur droit et celle du postérieur droit ont été calculées ; elles correspondent à la différence entre la rétraction maximale et la protraction maximale du membre.

Pour étudier les mouvements verticaux de la tête, le marqueur placé en regard de la tempe a servi de repère (figure 9).

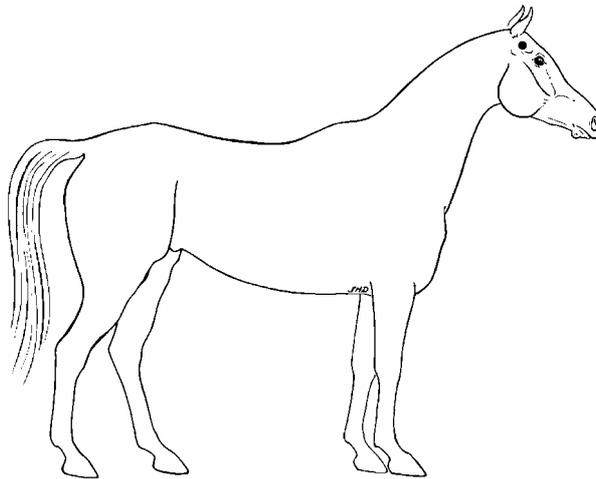


Figure 9: Mesure des mouvements verticaux de la tête.

Les mouvements de balancier du bloc tête – encolure ont été décrits en calculant à chaque instant l'angle formé par l'encolure avec l'axe horizontal. Des marqueurs placés sur la tête de l'animal, au niveau de l'os temporal, et sur la pointe de l'épaule ont servis de repères pour représenter l'axe de l'encolure (figure 10).

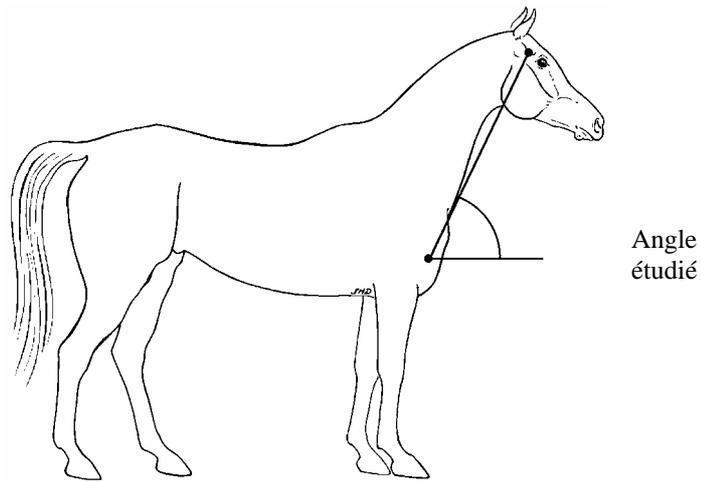


Figure 10: Mesure des mouvements de balancier du bloc tête - encolure.

Les mouvements verticaux du thorax ont été évalués en observant le marqueur situé en arrière du passage de la sangle (figure 11), à proximité du centre de gravité du cheval.

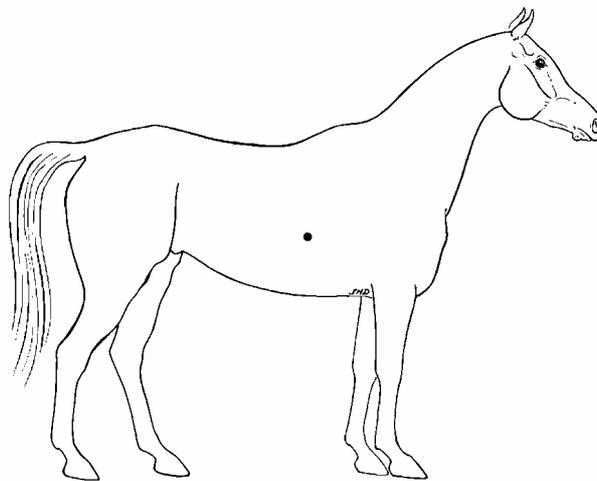


Figure 11: Mesure des mouvements verticaux du thorax.

Les mouvements de balancier du tronc, eux, ont été décrits en calculant à chaque instant l'angle formé par l'axe épaule – angle de la hanche avec l'axe horizontal. Ce premier axe a été représenté par la droite passant par le marqueur placé sur l'aile de l'ilium et celui placé sur la pointe de l'épaule (figure 12).

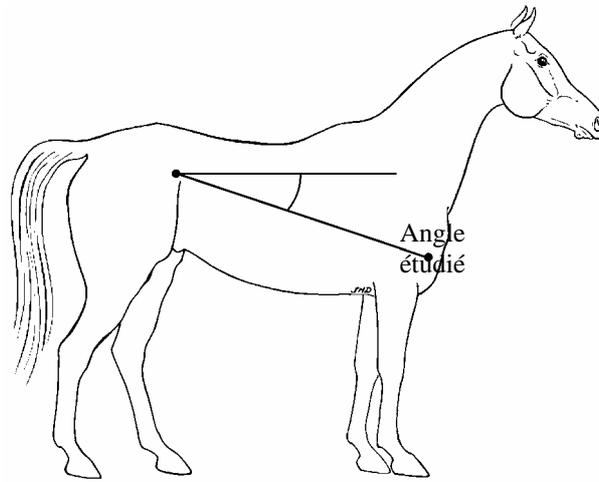


Figure 12: Mesure des mouvements de balancier du tronc.

Pour éviter les erreurs causées par le calcul d'angle projeté sur le repère absolu avec un mouvement sur le cercle, tous les angles ont été calculés à l'aide du produit scalaire des coordonnées 3D des marqueurs, ce qui a permis de travailler en se plaçant dans un « repère cheval (figure 13).

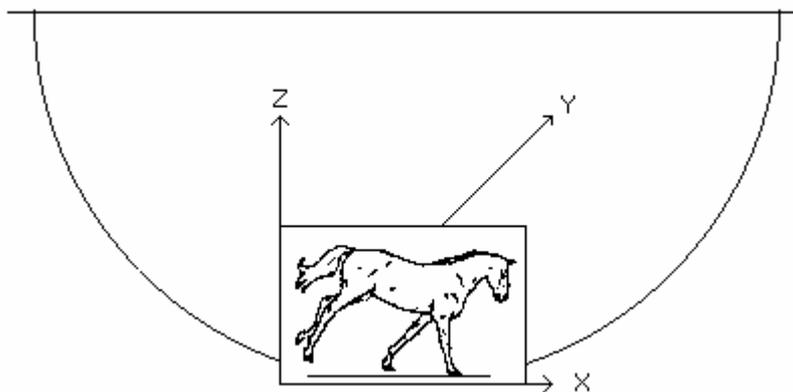


Figure 13: Repère absolu.

Pour chaque mouvement, les décours verticaux ou angulaires (évolution de l'altitude du marqueur ou de l'angle articulaire en fonction du temps) ont été déterminés.

F/ ANALYSE STATISTIQUE DES DONNEES

Des courbes ont été tracées pour chaque paramètre, représentant la moyenne des cinq passages d'un même animal. L'exemple d'un cheval a été présenté à chaque fois.

Pour chaque paramètre étudié, la moyenne sur les cinq passages d'un cheval a été calculée ainsi que l'écart-type correspondant. Ainsi la variabilité intra-individuelle, soit la variabilité des mouvements de chaque cheval entre les cinq passages, a pu être estimée.

Des diagrammes en bâton ont été établis sur l'ensemble des chevaux, indiquant la valeur moyenne du paramètre pour chaque individu. Chaque colonne est surmontée d'un petit trait représentant l'écart-type.

Ces représentations graphiques ont permis de comparer les différents chevaux entre eux, d'estimer la régularité des mouvements du cheval de voltige en général, soit la variabilité inter-individuelle.

G/ PRECISION DES MESURES

Les caméras sont soumises à des aberrations optiques qui induisent des erreurs de mesure sur le calcul des coordonnées 3D des marqueurs et ceci essentiellement en bordure de champ. Le cheval est alors déformé.

Il est donc souhaitable de vérifier la précision des mesures. Pour cela, la distance 3D des deux marqueurs de la tête a été calculée tout au long des enregistrements. Celle-ci est supposée être constante.

La variation de cette distance intra-passage a été calculée à partir de l'écart-type de la distance sur l'ensemble des images du passage.

$$\sigma (\text{intra-passage}) = \sqrt{\frac{\sum_i (\omega - d_i)^2}{N}}$$

i : image

N : nombre d'images pour un passage

d_i : distance entre les deux marqueurs pour l'image i

ω : distance moyenne des deux marqueurs sur les N images = $\frac{\sum_i d_i}{N}$

De plus, la variation de la distance des deux marqueurs de la tête inter-passage a été évaluée en calculant l'écart-type des distances moyennes de chaque passage sur l'ensemble des passages d'un cheval. Cette distance devrait aussi être constante; la variation doit, en théorie, être nulle. Cette variable a permis de vérifier que les changements de trajectoires n'influaient pas sur la fiabilité des mesures. Même si la hauteur de la tête ou la vitesse n'étaient pas constantes, ou si l'éloignement transversal du cheval par rapport aux caméras variait, les mesures des distances devaient rester proches.

$$\sigma (\text{inter-passage}) = \sqrt{\frac{\sum_t (\bar{\omega} - \omega_t)^2}{5}}$$

t : passage

ω_t : distance moyenne des marqueurs sur le passage t

$\bar{\omega}$: moyenne des distances moyennes sur les cinq passages = $\frac{\sum_t \omega_t}{5}$

CHAPITRE II :
RESULTATS

A/ PRECISION DES MESURES

La distance entre les deux marqueurs de la tête a été calculée pour chaque image au cours des différents passages. Les moyennes ont été calculées ainsi que les écart-types. Les valeurs suivantes, notées dans le tableau 2, ont été obtenues:

Nom du cheval	σ intra-passage (mm)	σ inter-passage (mm)
Banco	3,1	0,8
Beauty	3,7	0,11
Diamos	2,9	0,9
Egine	2,9	0,12
Papaz	4,2	0,4
Quitus	3,4	0,14
Saphir	3,1	0,5
Taxy	2,8	0,7
Turco	3,1	0,5
Moyenne	3,2	0,8

Sur l'ensemble des chevaux, on obtient :

Variation de la distance intra-passage (mm) = $3,2 \pm 0,3$

Variation de la distance inter-passage (mm) = $0,8 \pm 0,3$

Tableau 2 : Variations intra- et inter-passages de la distance entre les deux marqueurs de la tête.

B/ DESCRIPTION GLOBALE DU MOUVEMENT D'UN CHEVAL AU GALOP

La description des mouvements du cheval au galop peut se faire grâce à l'observation d'une série de photos ainsi que par la réalisation de kinogrammes.

L'ensemble des photos suivantes (figures 14, a à k) représente une foulée de galop à main gauche. La première image de la série correspond au poser du postérieur droit. Ces figures 2D proviennent des enregistrements vidéo effectués au CEZ de Rambouillet. L'image a été volontairement assombrie pour permettre la détection informatique des marqueurs. Chaque image est séparée de la suivante par 0,06 seconde.

Figure 14a : Poser du postérieur droit ; les autres membres sont levés : le postérieur gauche est en phase de protraction ; le canon antérieur droit est proche de la verticalité et le membre antérieur gauche est en début de phase de ramener.



Figure 14b : Le canon postérieur droit se rapproche de la verticalité ; l'antérieur droit et le postérieur gauche sont en protraction maximale:



Figure 14c : Le postérieur droit est en phase de propulsion (la verticalité du canon est passée); le diagonal droit (antérieur droit et postérieur gauche) s'est posé; le canon antérieur gauche passe la verticalité :



Figure 14d : Lever du postérieur droit et verticalité du canon antérieur droit. Le postérieur gauche reste toujours très engagé sous le tronc. Il y a donc une différence par rapport à l'image précédente où le canon antérieur droit et le canon postérieur gauche ont une orientation assez similaire:



Figure 14e : Phase de ramener du postérieur droit, l'antérieur droit est en phase de propulsion (la verticalité du canon est passée). Le postérieur gauche reste toujours très engagé sous le tronc. L'antérieur gauche est en protraction maximale (mouvement d'embrassée):

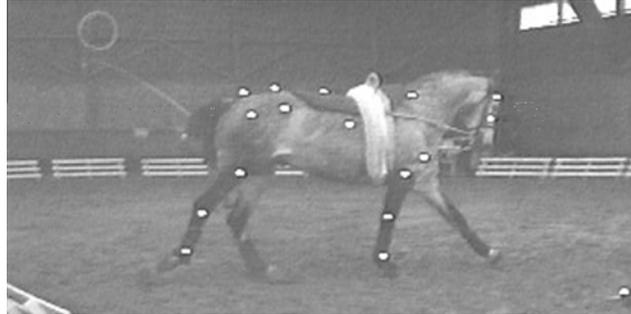


Figure 14f : Phase de ramener du postérieur droit. L'antérieur droit termine sa phase de propulsion. La verticalité du canon du postérieur gauche est atteinte. L'antérieur gauche s'est posé et entre en phase de mise en charge (phase d'amortissement):



Figure 14g : Le diagonal droit s'est levé: l'antérieur droit et le postérieur gauche entament leur phase de ramener. Seul l'antérieur gauche est en appui:



Figure 14h : Le canon antérieur gauche atteint sa verticalité (= position de transition entre la phase d'amortissement et la phase de propulsion). Les trois autres membres sont en phase de ramener:



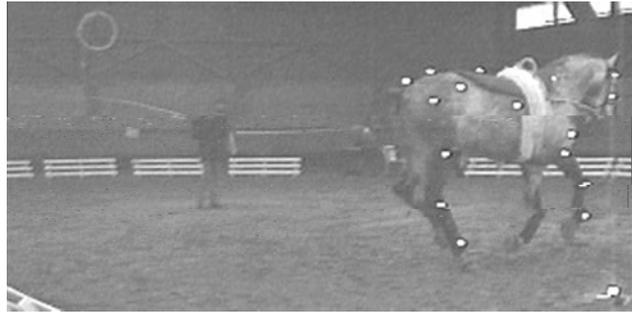
Figure 14i : Le canon antérieur gauche est vertical. Les trois autres membres sont en phase de ramener, le postérieur droit commence son engagement sous le tronc:



Figure 14j : L'antérieur gauche a terminé sa phase d'appui et est en train de se lever. Le postérieur droit s'engage pour venir se poser:



Figure 14k : Le cheval est ici en phase de suspension: les quatre membres sont levés. Le postérieur droit atteint son engagement maximal (protraction maximale) pour venir se poser sur le sol. L'image suivante serait la figure 14a.



Figures 14, a à k: Décomposition d'une foulée de galop à main gauche.

Les kinogrammes suivants (figures 15 et 16) ont été réalisés. Ils représentent les trajectoires des membres antérieur et postérieur droits au cours d'une foulée de galop.

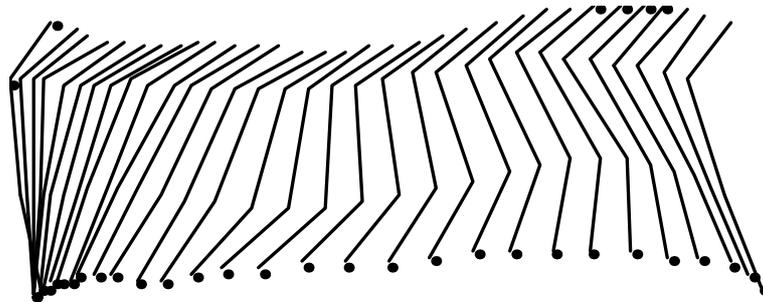


Figure 15: Kinogramme de l'antérieur droit.

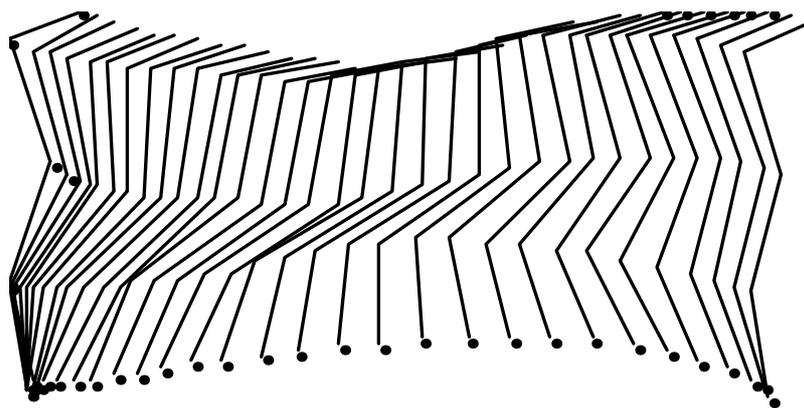


Figure 16: Kinogramme du postérieur droit.

C/ DESCRIPTION DE MOUVEMENTS PARTICULIERS

1/ La vitesse du cheval:

Le graphe ci-dessous (figure 17) représente la vitesse moyenne en mètre par seconde (m/s) de chaque cheval, ainsi que son écart-type.

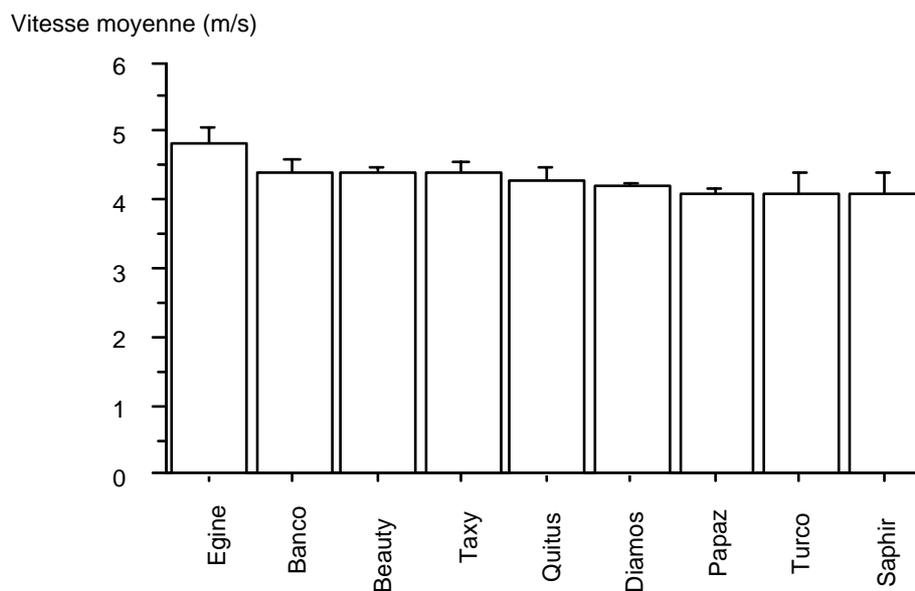


Figure17: Vitesse moyenne des chevaux

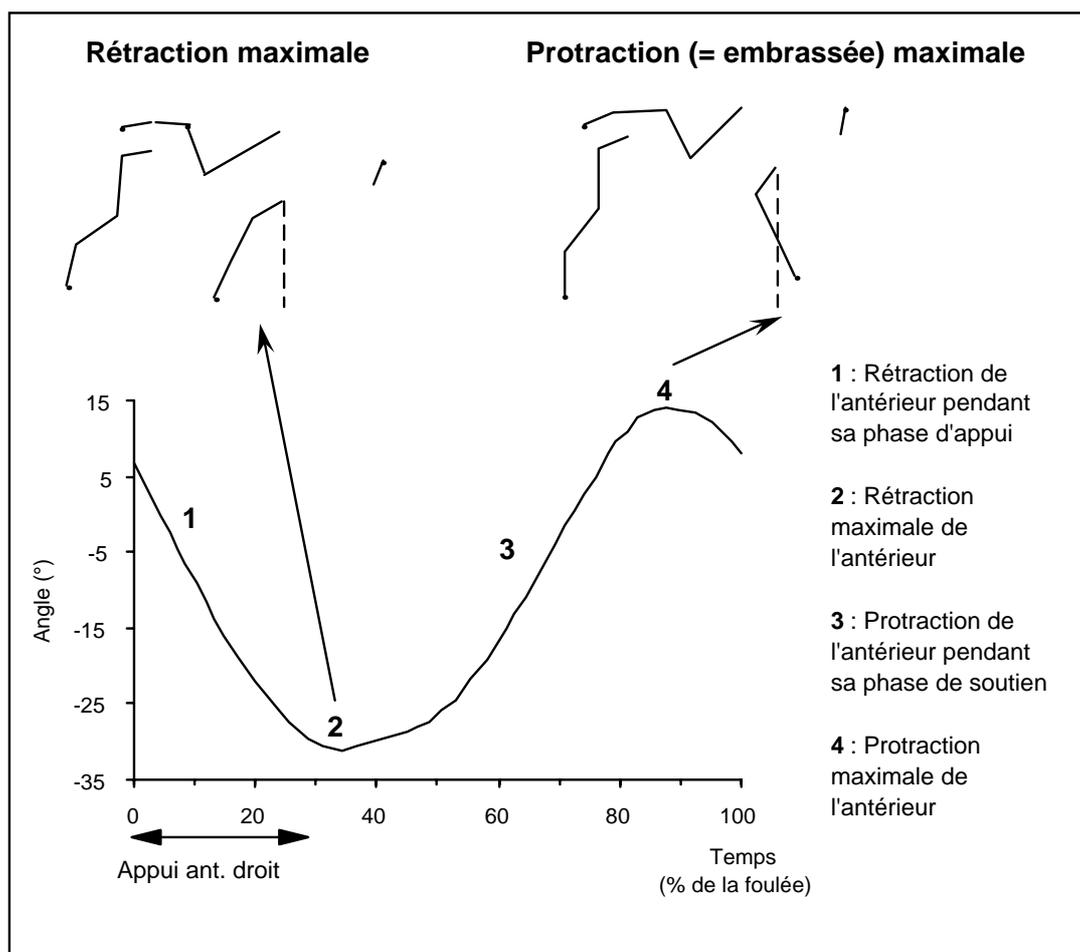
La vitesse moyenne des passages était très comparable d'un cheval à l'autre (entre 4 et 4,5 m/s), à l'exception de EGINE qui galopait nettement plus vite. Les chevaux conservaient une vitesse régulière entre les passages: DIAMOS étant le cheval dont la vitesse était la plus stable.

2/ Les mouvements pendulaires des membres :

De nombreux paramètres pouvaient être utilisés pour décrire les mouvements des membres. Dans une première approche, seuls ont été décrits les mouvements pendulaires de l'antérieur droit et ceux du postérieur droit, c'est à dire les mouvements avant-arrière de ces membres dans leur ensemble.

2.1 Description des mouvements pendulaires de l'antérieur droit :

Les mouvements pendulaires de l'antérieur droit ont été décrits en calculant à chaque instant l'angle formé par l'axe épaule - boulet antérieur avec l'axe vertical.



La figure 18 décrit les mouvements pendulaires de l'antérieur droit lors d'une foulée de galop à main gauche. Quatre grandes étapes pouvaient être identifiées dans ce mouvement:

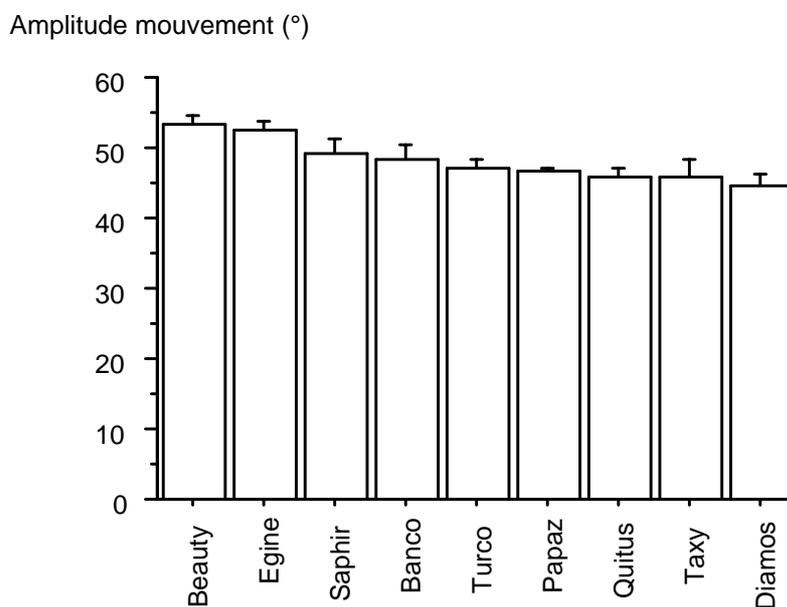
- 1 - pendant la phase d'appui, le membre antérieur part progressivement sous le tronc, décrivant ainsi un mouvement de rétraction;
- 2 - la rétraction maximale de l'antérieur (= position la plus reculée du membre antérieur

Figure 18: Mouvements pendulaires de l'antérieur droit pendant une foulée de galop (exemple du cheval Quitus).

par rapport au tronc) se produit légèrement après le lever de l'antérieur. Un léger plateau est ensuite présent sur la courbe. Ce plateau correspond à la transition entre le mouvement de rétraction et le début du mouvement de protraction du membre;

- 3 - un mouvement de protraction se produit ensuite pendant la phase de soutien;
- 4 - la protraction maximale (= embrassée maximale) de l'antérieur, c'est à dire l'avancée maximale de l'antérieur par rapport au tronc, se produit à la fin de la phase de soutien juste avant le poser de l'antérieur.

L'amplitude de ces mouvements pendulaires (= différence entre la rétraction maximale et la protraction maximale de l'antérieur) a été calculée à chaque passage. L'amplitude moyenne des mouvements pendulaires du membre antérieur droit a été calculée pour chaque cheval (Figure 19).



Les variations intra-individuelles de l'amplitude des mouvements pendulaires étaient faibles : le cheval Papaz présentant la plus faible variabilité intra-individuelle (c'est à dire la plus faible variabilité inter-passage).

La protraction maximale de l'antérieur droit a été calculée pour chaque passage (Figure 20).

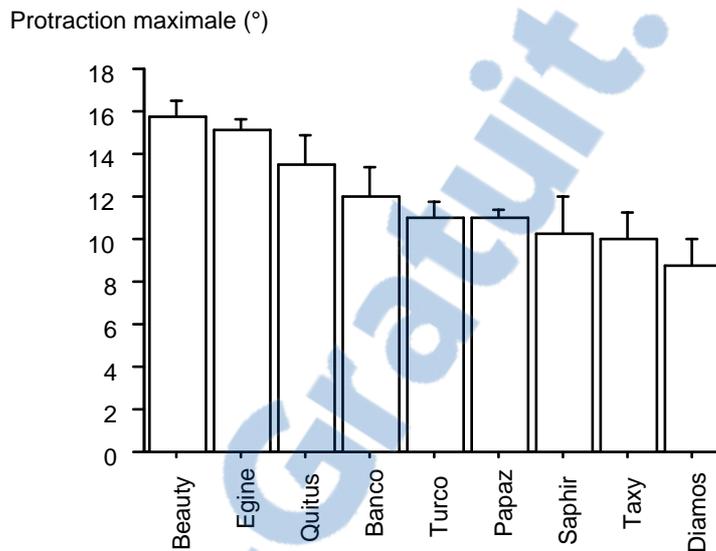
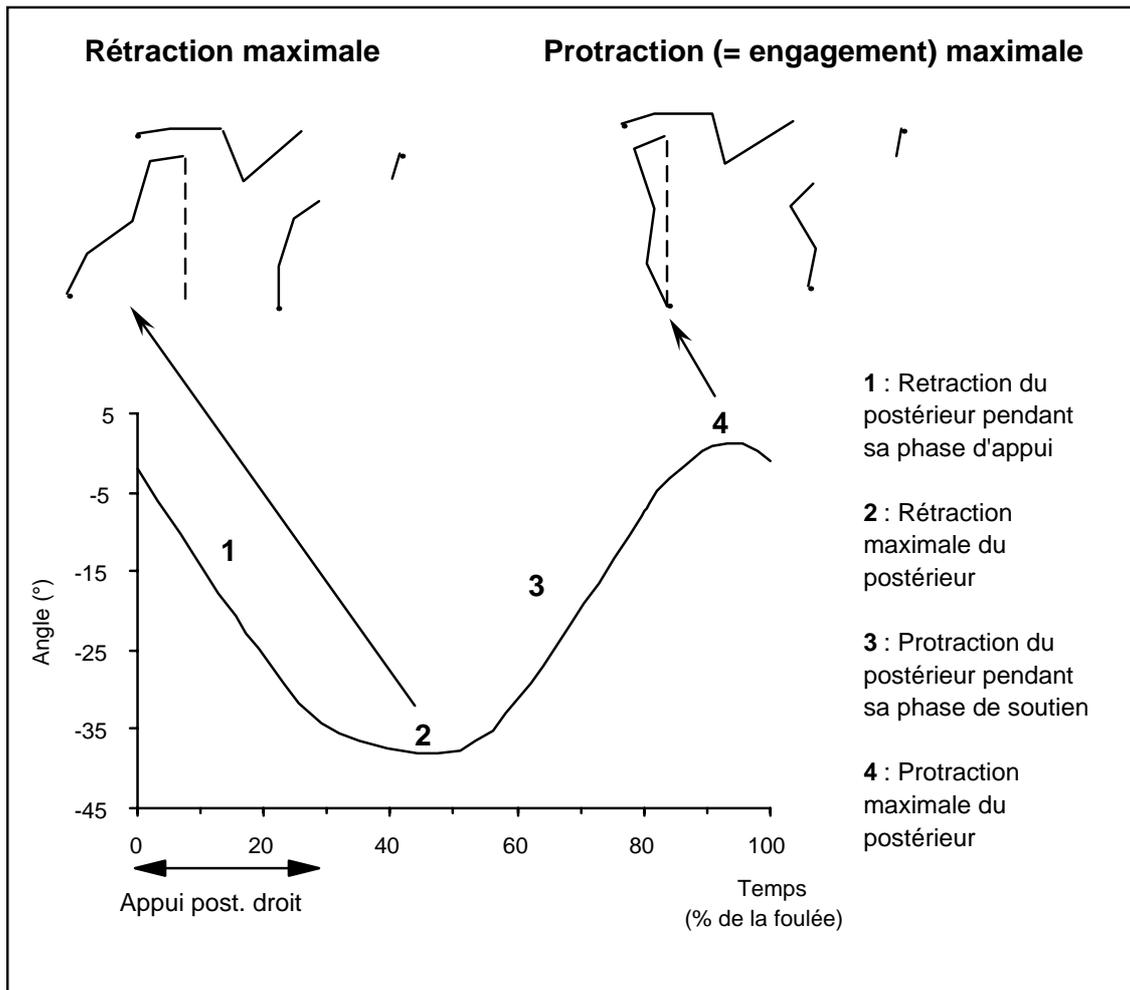


Figure 20: Protraction (= embrassée) maximale de l'antérieur droit

La variabilité inter-passage était de nouveau la plus faible pour le cheval Papaz.

2.2/ Description des mouvements pendulaires du postérieur droit :

Les mouvements pendulaires du postérieur droit ont été décrits en calculant à chaque instant l'angle formé par l'axe ilium - boulet postérieur avec l'axe vertical.



La figure 21 décrit les mouvements pendulaires du postérieur droit lors d'une foulée de galop à main gauche. Quatre grandes étapes pouvaient être identifiées dans ce mouvement:

1 - pendant la phase d'appui, le membre postérieur part progressivement vers l'arrière, décrivant ainsi un mouvement de rétraction;

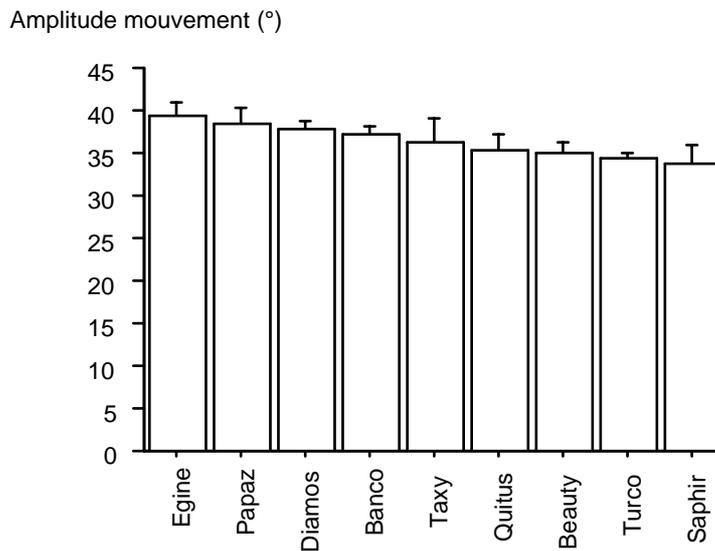
Figure 21: Mouvements pendulaires du postérieur droit pendant une foulée de galop (exemple du cheval Egine).

2 - la rétraction maximale du postérieur (= position la plus reculée du membre postérieur par rapport au tronc) se produit après le lever du postérieur. Un léger plateau sépare le lever du postérieur de la rétraction maximale. Ce plateau correspond à la transition entre le mouvement de rétraction et le début du mouvement de protraction du membre;

3 - un mouvement de protraction se produit ensuite pendant la phase de soutien;

4 - la protraction maximale (= engagement maximal) du postérieur, c'est à dire l'avancée maximale du postérieur sous le tronc, se produit à la fin de la phase de soutien juste avant le poser du postérieur.

L'amplitude moyenne des mouvements pendulaires du membre postérieur droit a été calculée pour chaque cheval (Figure 22).



Ces résultats montrent que l'amplitude des mouvements pendulaires du postérieur droit était plus faible que l'amplitude des mouvements pendulaires de l'antérieur droit.

Figure 22 : Amplitude moyenne des mouvements pendulaires du postérieur droit.

La protraction maximale du postérieur droit a été calculée pour chaque passage. L'engagement du postérieur a été évalué en comparant l'avancée du boulet postérieur par rapport à la croupe, plus précisément par rapport au marqueur placé sur le tuber coxae.

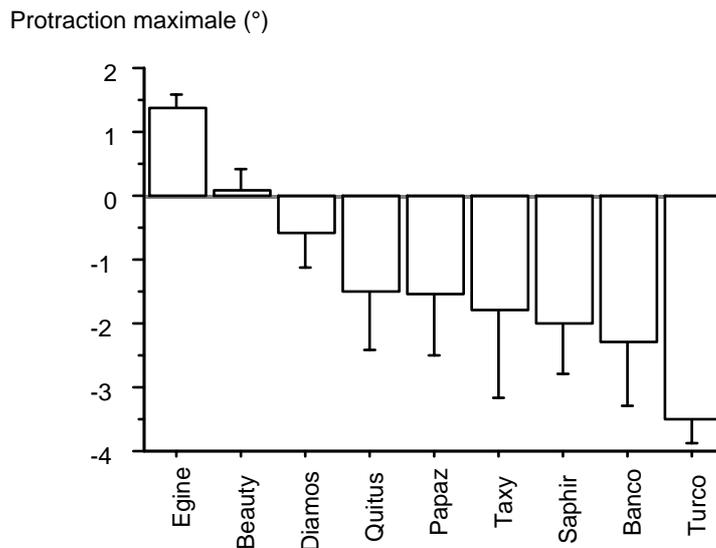


Figure 23: Protraction (engagement) maximale du postérieur droit.

La figure 23 montre que le boulet postérieur s'avance généralement jusqu'au niveau du tuber coxae. Plus précisément:

- si le marqueur du boulet postérieur s'avance jusqu'à atteindre la verticale passant par le tuber coxae: l'angle mesurant l'engagement maximal du postérieur est alors égal à 0°. C'était le cas de Beauty;
- si le marqueur du boulet postérieur s'avance en avant de la verticale passant par le tuber coxae: l'angle mesurant l'engagement maximal du postérieur prend alors des valeurs positives. C'était le cas de Egine;
- si le marqueur du boulet postérieur reste en arrière de la verticale passant par le tuber coxae: l'angle mesurant l'engagement maximal du postérieur prend alors des valeurs négatives. C'était le cas des autres chevaux.

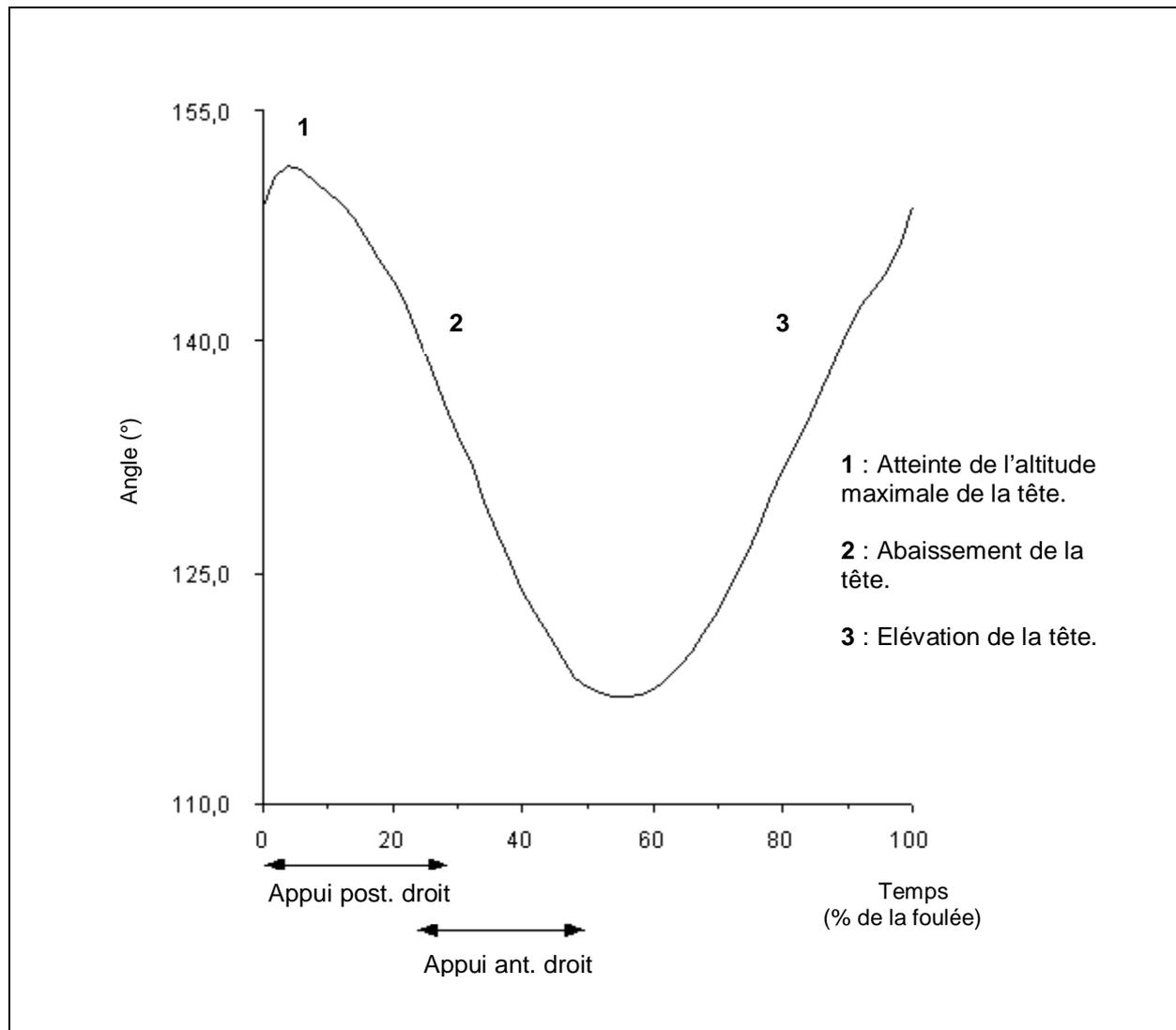
3/ Les mouvements de la tête et de l'encolure :

De nombreux paramètres pouvaient être utilisés pour décrire les mouvements de la

tête. Seuls ont été décrits les mouvements de balancier du bloc tête - encolure et les mouvements verticaux de la tête.

3.1 / Description des mouvements verticaux de la tête :

Les mouvements verticaux de la tête ont été décrits à l'aide du marqueur situé sur la tempe du cheval.



La figure 24 décrit les mouvements verticaux de la tête lors d'une foulée de galop à main gauche. Trois grandes étapes pouvaient être identifiées dans ce mouvement:

- 1 - Du poser postérieur droit à la protraction maximale de l'antérieur droit, l'altitude de la tête augmente. La hauteur maximale de la tête est atteinte vers le temps $t = 8\%$ de la foulée, c'est à dire environ au moment de la verticalité du canon postérieur droit;
- 2 - Après la protraction maximale de l'antérieur droit, l'altitude de la tête diminue pendant sa phase d'appui, et jusqu'au posé de l'antérieur gauche. Elle correspond à la phase d'abaissement du bloc tête - encolure, mais le tête inverse sa trajectoire légèrement plus précocement.
- 3 - Après le posé de l'antérieur gauche, l'altitude de la tête commence à croître.

L'amplitude moyenne des mouvements verticaux de la tête a été calculée pour chaque cheval (figure 25).

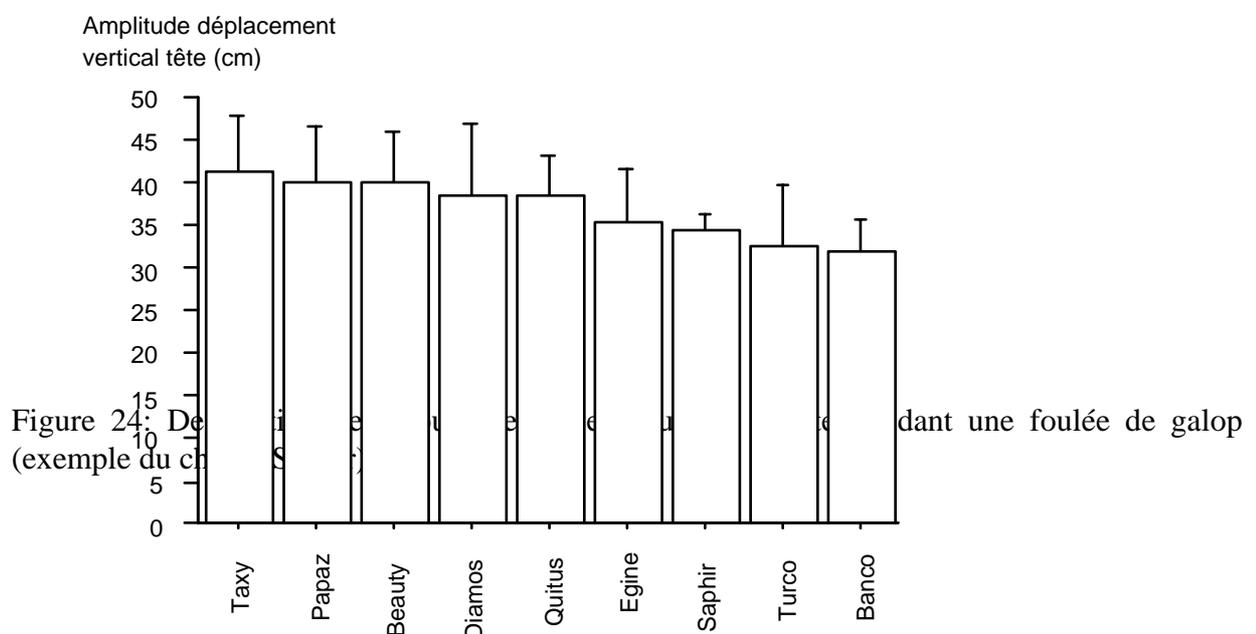


Figure 25 : Amplitude moyenne des mouvements verticaux de la tête.

Sur ce groupe de chevaux, l'amplitude moyenne des mouvements verticaux de la tête était comprise entre 30 et 45 cm. Elle était très variable d'un passage à l'autre.

3.2/ Description des mouvements de balancier de la tête et de l'encolure :

Les mouvements du balancier cervico-céphalique ont été décrits en calculant à chaque instant l'angle formé par l'encolure avec l'axe horizontal.

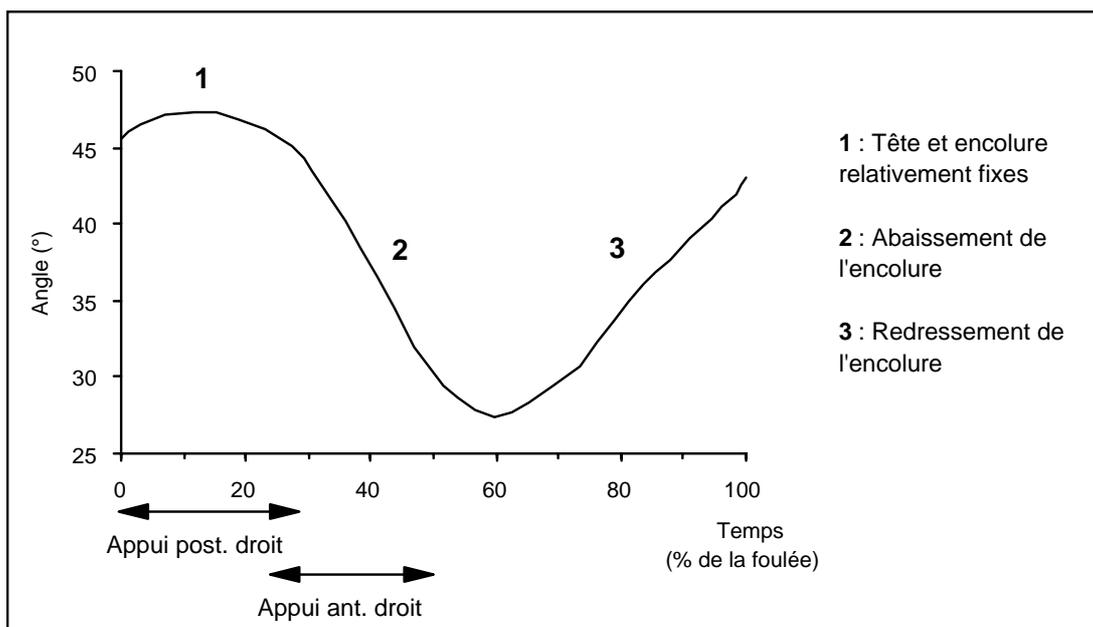


Figure 26: Mouvements de balancier du bloc tête - encolure pendant une foulée de galop (exemple du cheval Beauty).

- 1 - pendant la phase d'appui du postérieur droit, le bloc tête - encolure garde une orientation relativement fixe;
- 2 - pendant la phase d'appui de l'antérieur droit et du postérieur gauche (= phase d'appui du diagonal droit), un abaissement de l'encolure se produit;
- 3 - une élévation de l'encolure se produit pendant la dernière partie de la foulée, c'est à dire pendant la phase d'appui de l'antérieur gauche et la phase de suspension.

L'amplitude de ces mouvements (= différence entre l'élévation maximale et l'abaissement maximal de l'encolure) a été calculée à chaque passage et pour chaque cheval (figure 27).

La figure 26 décrit les mouvements de balancier du bloc tête - encolure lors d'une foulée de galop à main gauche. Trois grandes étapes pouvaient être identifiées dans ce mouvement:

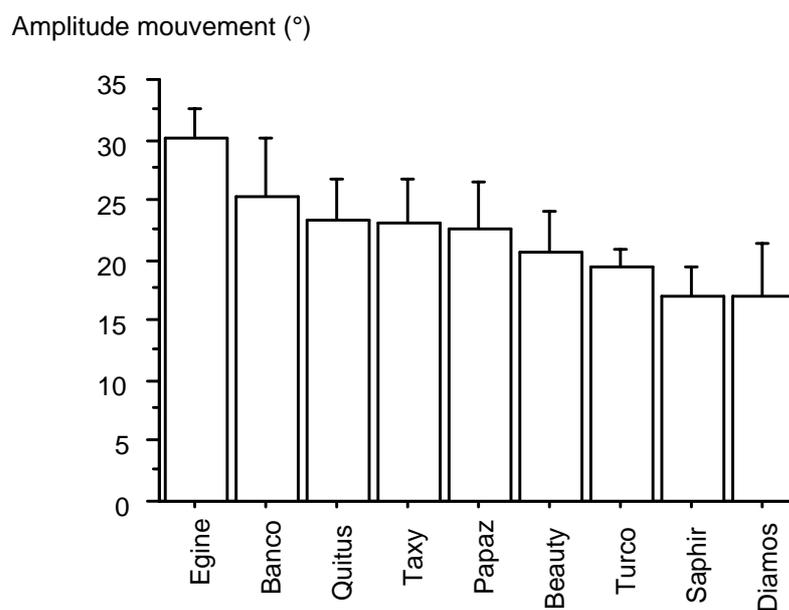


Figure 27: Amplitude moyenne des mouvements de balancier du bloc tête-encolure

Eglise présentait une amplitude des mouvements de balancier du bloc tête - encolure supérieure à celle des autres chevaux.

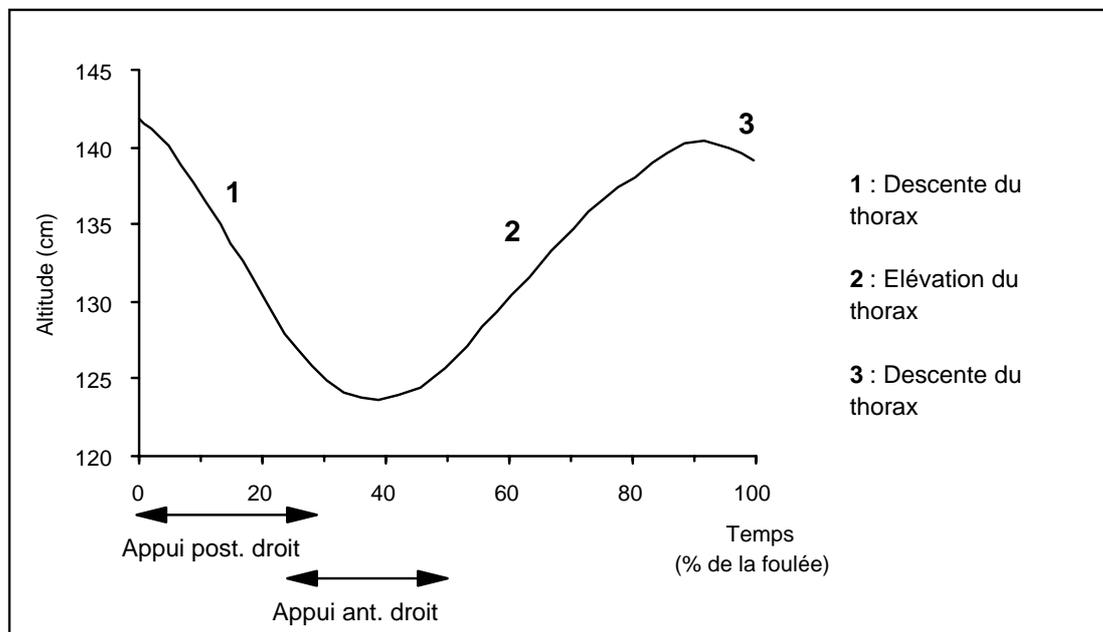
4/ Les mouvements du tronc :

Le voltigeur utilise, dans certains figures, l'énergie des mouvements du tronc du cheval. Il semblait alors intéressant d'étudier:

- l'amplitude des mouvements verticaux du thorax;
- l'amplitude des mouvements de balancier du tronc.

4.1/ Description des mouvements verticaux du thorax:

Les mouvements verticaux du thorax ont été évalués à l'aide du marqueur situé en arrière du passage de sangle, environ en regard du centre de gravité du tronc.



1 - Du poser postérieur droit à la verticalité du canon antérieur droit, l'altitude du thorax diminue. La hauteur minimale du marqueur thoracique est atteinte vers le temps $t = 40\%$

La figure 28 décrit les mouvements verticaux du thorax lors d'une foulée de galop à main gauche. Trois grandes étapes pouvaient être identifiées dans ce mouvement:

de la foulée, c'est à dire environ au moment de la verticalité du canon antérieur droit;
 Figure 28: Mouvements verticaux du thorax pendant une foulée de galop (exemple du cheval Turco).

2 - Après la verticalité du canon antérieur droit, l'altitude du thorax augmente jusqu'à la phase de suspension. Cette augmentation d'altitude est générée par la propulsion du diagonal droit (propulsion du postérieur gauche surtout) et par le mouvement de redressement de l'encolure et du tronc (mouvement de redressement se produisant pendant la phase d'appui de l'antérieur gauche);

3 - l'altitude maximale du marqueur situé à proximité du centre de gravité est atteinte pendant la phase de suspension. A la fin de cette phase de suspension, l'altitude de ce marqueur commence à décroître.

L'amplitude moyenne des mouvements verticaux du thorax a été calculée pour chaque cheval (figure 29).

Amplitude déplacement
vertical thorax (cm)

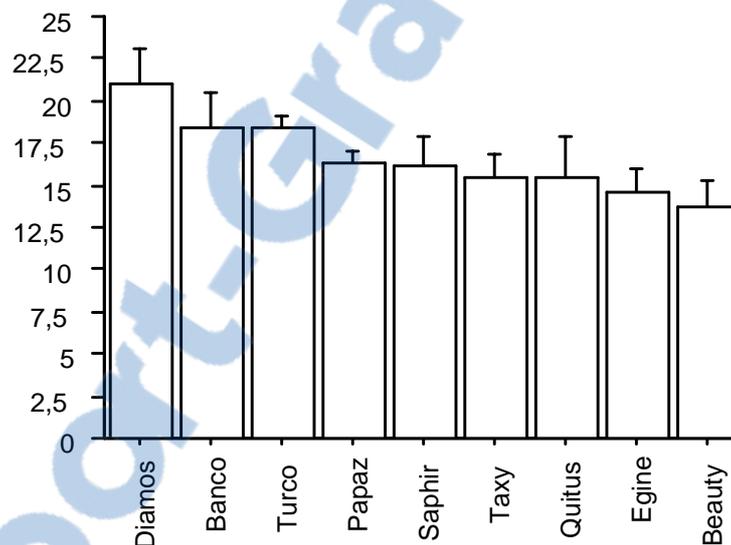
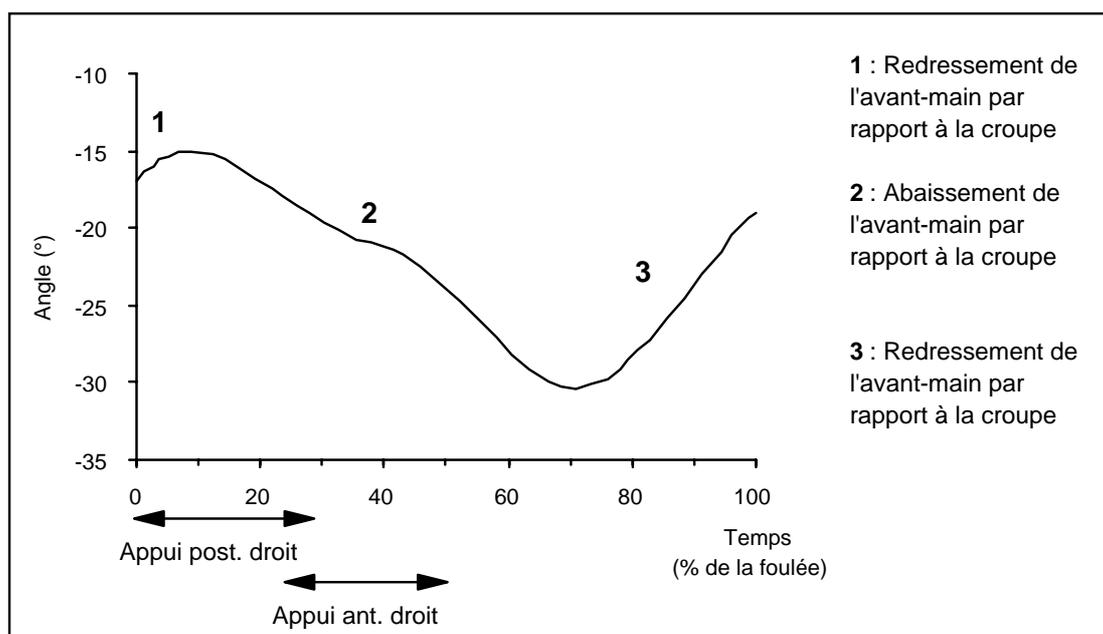


Figure 29: Amplitude moyenne des mouvements verticaux du thorax.
4.2/ Description des mouvements de balancier du tronc:

Les mouvements du balancier du tronc pouvaient être décrits en calculant à chaque instant l'angle formé par l'axe épaule - ilium avec l'axe horizontal.



1 - pendant la première moitié de la phase d'appui du postérieur droit (du poser du membre jusqu'à la verticalité du canon postérieur droit), l'avant-main s'élève par rapport à l'arrière-main;

2 - l'avant-main s'abaisse ensuite par rapport à l'arrière-main. Cet abaissement de l'avant-main débute avec la seconde moitié de la phase d'appui du postérieur droit (après la verticalité du canon postérieur droit) et se continue jusqu'à la phase d'appui de

La figure 30 décrit les mouvements de balancier du tronc lors d'une foulée de galop à main gauche. Trois grandes étapes pouvaient être identifiées dans ce mouvement:

l'antérieur gauche. Un léger plateau est généralement visible sur la courbe pour le temps

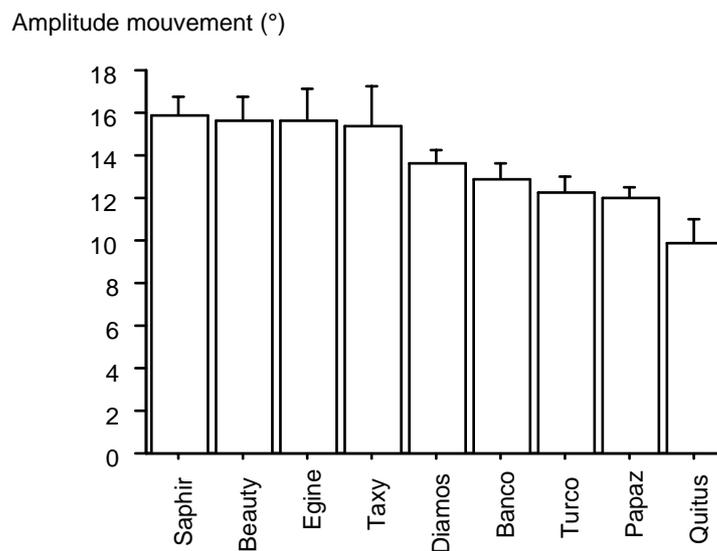
Figure 30: Mouvements de balancier du tronc pendant une foulée de galop (exemple du cheval Beauty)

t = 40% de la foulée. Ce temps correspond au milieu de la phase d'appui de l'antérieur droit (verticalité du canon antérieur droit);

3 - une élévation de l'avant - main se produit pendant la dernière partie de la foulée, c'est à dire pendant la phase d'appui de l'antérieur gauche et la phase de suspension.

Ces mouvements de balancier du tronc sont donc relativement synchrones des mouvements de balancier du bloc tête-encolure.

L'amplitude moyenne des mouvements de balancier du tronc a été calculée pour chaque cheval (Figure 31).



Quitus est le cheval pour lequel l'amplitude de mouvement de balancier était la plus faible. Quatre chevaux avaient une amplitude quasi équivalente ; il s'agissait de Saphir, Beauty, Egine et Taxy.

Figure 31: Amplitude moyenne des mouvements de balancier du tronc.

Bilan:

En faisant l'hypothèse que ces deux types de mouvements ont la même importance pour la fourniture d'énergie au voltigeur, il est envisageable de proposer un classement des chevaux en utilisant les résultats présentés aux figures 29 et 31. Une note de 1 a ainsi été donnée pour le premier cheval, une note de 2 a été donnée pour le deuxième cheval, etc... en sommant les notes de chaque cheval pour les deux types de mouvement (mouvements vertical et de balancier du thorax), le classement suivant a été obtenu:

- Diamos et Saphir = 6
- Banco = 8
- Taxy et Turco = 10
- Beauty et EGINE = 11
- Papaz = 12
- Quitus = 16

Diamos et Saphir sont les chevaux qui présentaient les mouvements du tronc les plus amples et par conséquent peut être les chevaux les plus aptes à fournir de l'énergie au voltigeur pour réaliser ses figures.

CHAPITRE III :
DISCUSSION

Au cours de la réalisation de cette étude de nombreuses questions se sont posées, tant sur le protocole que sur les résultats, auxquelles il a fallu trouver des solutions. Les réponses aux problèmes soulevés sont abordées successivement.

A/ LE PROTOCOLE : SES POINTS FORTS ET SES LIMITES

1/ Précision des mesures :

Pour que cette étude sur la locomotion du cheval de voltige soit fiable, les mesures obtenues doivent être précises. Or des erreurs sur les coordonnées 3D des marqueurs peuvent apparaître et ce pour deux raisons. D'une part, les caméscopes sont soumis à des aberrations optiques qui peuvent déformer les chevaux aux marges du champ d'enregistrement et donc altérer la position des marqueurs, comme le montre la figure 32.

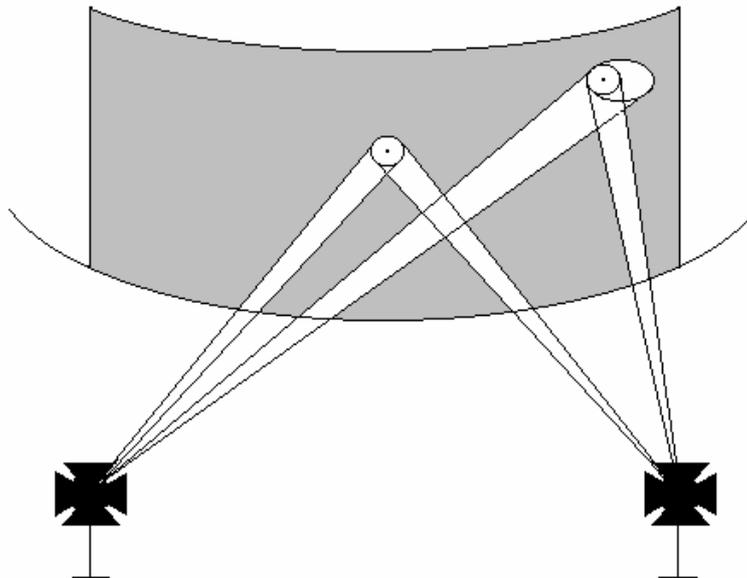


Figure 32 : Aberrations optiques en périphérie du champ d'enregistrement.

D'autre part, des erreurs aléatoires se produisent lors du relevé de la position 2D des marqueurs sur les enregistrements vidéo.

Une manière simple pour s'assurer de la précision des mesures était d'évaluer les variations de mesure d'une distance constante. De plus, pour simplifier encore l'évaluation de cette précision, nous avons utilisé des marqueurs placés sur le cheval. La distance entre les deux marqueurs de la tête pouvant être supposée constante, cette distance a été choisie comme référence.

Les valeurs obtenues (variation de la distance intra - pas

pour cela, il faudrait rajouter deux caméras et les placer de l'autre côté de l'animal. Et alors le problème du choix de leur position se poserait.

D'une part, les caméscopes ne peuvent pas être placés autour de la piste, symétriquement par rapport au centre du cercle car sinon, par moment, le longeur masquerait l'objet filmé (caméras 1 de la figure 33). Ils ne peuvent pas non plus être installés à l'intérieur du cercle, entre le longeur et le cheval: les câbles associés couperaient la trajectoire de l'animal (caméras 2 de la figure 33).

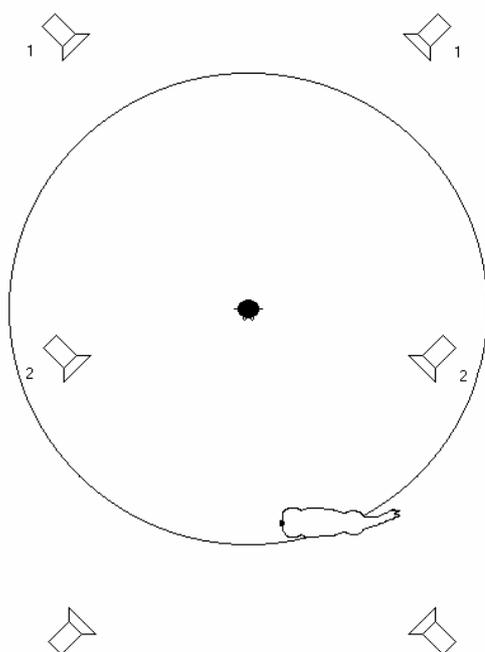


Figure 33 : Positions possibles des caméras.

D'autre part, le cheval doit être le plus possible perpendiculaire au caméras pour éviter la superposition des marqueurs, sinon la lecture informatique de leur coordonnées deviendrait impossible. Ainsi les caméras ne peuvent pas être déplacées vers le champ filmé car l'angle de prise de vue deviendrait trop aiguë (figure 34).

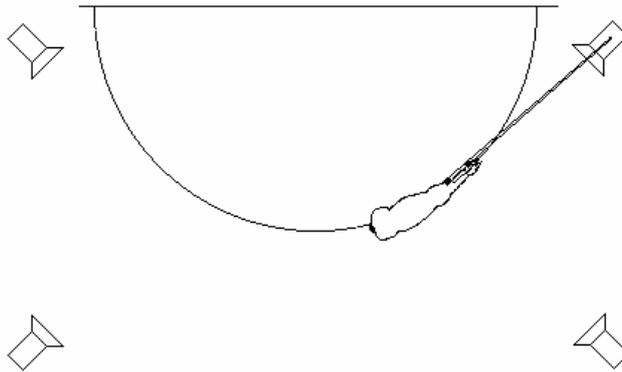


Figure 34 : Superposition des marqueurs

Une solution intermédiaire semble toutefois envisageable (figure 35). Peut être qu'en plaçant les caméras un peu plus loin par rapport à la ligne de l'hémicercle d'enregistrement, les marqueurs ne se superposeraient pas. Mais dans ce cas, pour fournir suffisamment de lumière pour les enregistrements vidéos, les projecteurs entourant les caméras doivent être placés près de la piste, ce qui peut vraisemblablement gêner certains chevaux..

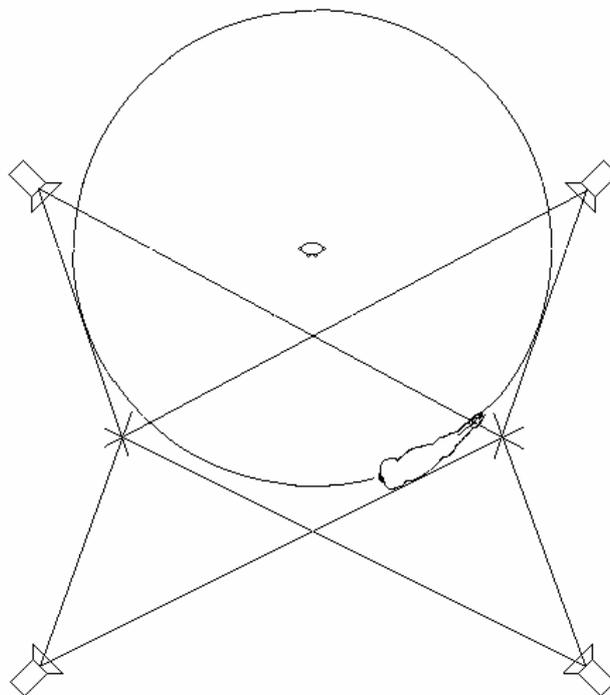


Figure 35 : Solution intermédiaire de position des caméras.

4/ La position des marqueurs :

Pour des raisons pratiques, des marqueurs ont été omis par rapport aux normes établies dans certaines recherches (Fredricson et Drevemo, 1972; Leach et Cymbaluk, 1986; Martinez-del Campo *et al.*, 1991; Audigié *et al.*, 1998). En effet le marqueur du dos placé en regard de la treizième vertèbre thoracique ou les marqueurs des sabots antérieur et postérieur n'ont pas pu être collés, le premier pour des contraintes d'enrênement et les derniers à cause du terrain mou.

D'autres marqueurs ont été déplacés, aussi pour des raisons pratiques. Par exemple, le marqueur du «garrot» n'a pas pu être collé à cause de l'arçon. Il a donc été mis à la base de l'encolure.

Généralement, l'absence de marqueur n'a pour conséquence que le manque de données. Celui du sabot a pourtant engendré un problème pour la définition de la foulée.

Pour un cheval au galop à main gauche, une foulée serait habituellement définie comme débutant avec le poser du postérieur droit (temps = 0) et se terminant avec le poser suivant de ce même membre, soit un cycle complet du mouvement d'un membre (Clayton, 1989; Barrey, 1999). Or, le poser du membre est un acte instantané. Le caméscope filmant une image toutes les 20 millisecondes, plusieurs images peuvent correspondre à ce même acte. L'acuité visuelle humaine n'est pas assez sensible pour permettre de sélectionner une image. Une méthode mathématique est donc nécessaire pour améliorer l'identification de l'image la plus proche du poser du pied.

Au moment du poser, le sabot décélère jusqu'à que ses vitesses horizontale et verticale deviennent nulles; il est alors immobile au sol. Ainsi, Pourcelot *et al.* (1996) ont choisi de coller un marqueur sur le sabot et de sélectionner l'image correspondant au moment où les deux vitesses étaient nulles pour représenter l'instant du poser. Ceci n'était pas applicable dans cette étude. Le terrain d'enregistrement étant mou (piste de sable), le sabot s'enfonçait ce qui masque ou décolle le marqueur.

Mais durant ce moment, le boulet, lui, décélère pour atteindre une vitesse nulle puis négative; lorsque celui-ci recule, c'est à dire lors de la mise en charge du membre. Puis il reprend progressivement une vitesse positive. Ainsi, pour cette étude, le marqueur du boulet a servi de repère pour déterminer le moment exact du début de la foulée. L'image retenue

comme étant la première de la foulée est donc celle précédant l'image pour laquelle la vitesse horizontale du boulet devient négative.

Ce critère est arbitraire. Il est sans doute à l'origine d'une erreur sur l'exactitude du début de la foulée et donc du poser. Mais cette erreur est systématique et non aléatoire.

5/ Les paramètres étudiés :

Cette thèse décrit la locomotion du cheval au galop sur le cercle et ce à travers l'analyse de certains paramètres. Le but n'étant néanmoins pas de faire une analyse exhaustive de l'allure mais simplement une première approche pour tester la faisabilité d'une telle étude, de nombreux aspects n'ont pas été abordés. Mais à l'issue de ce travail, il apparaît cependant que les données récoltées lors de la séquence d'enregistrement permettraient l'obtention de nombreux autres renseignements sur les mouvements du cheval.

Ainsi, les caractéristiques du galop sur le cercle pourraient être étudiées et comparées à celles du galop en ligne droite. Les paramètres généralement étudiés dans la littérature, c'est à dire la longueur et la durée de la foulée, de la phase d'appui ou de la phase de soutien (Ratzlaff *et al.*, 1985; Leach *et al.*, 1987), ou les comportements angulaires articulaires (Back *et al.*, 1997), n'ont pas été étudiés ici, dans un premier travail sur la locomotion du cheval de voltige.

D'autres paramètres ayant un lien direct avec la voltige pourraient être étudiés. A titre d'exemple, la régularité des cercles pourrait être analysée, le cheval devant être le plus constant possible dans son allure. Et cela pourrait être réalisé en étudiant le décours transversal du marqueur du boulet antérieur droit.

De même, les mouvements verticaux et latéraux du dos pourraient être étudiés étant donné l'importance de cette partie du corps pour le voltigeur. Des marqueurs ont d'ailleurs été collés à proximité de la ligne médiane du dos dans ce but. En fait, ils se sont avérés inutilisables. Le cheval s'inclinant énormément vers l'intérieur du cercle, certains marqueurs se sont retrouvés parfois masqués. De plus, le marqueur situé en regard de la jonction thoracolumbaire, donc au milieu de la ligne du dos, a été collé sur le tapis de voltige ce qui fausse

complètement l'évaluation des mouvements du dos : sa courbe étant parasitée par les mouvements propres du tapis. Pour analyser les mouvements du dos, il faudrait donc placer des marqueurs plus latéralement par rapport au plan sagittal du cheval ou bien surélever les caméras, la hauteur restant à définir.

6/ Simplification des enregistrement :

Mais pour être véritablement une reproduction de la réalité, il aurait fallu filmé le cheval avec son voltigeur en train d'effectuer ses figures. Il est évident que la locomotion du cheval est alors modifiée. Lorsque le cavalier est sur le dos du cheval, les mouvements verticaux du tronc ou les mouvements de balancier de l'encolure doivent être perturbés. Lorsque le cavalier n'est pas centré sur le dos de l'animal, lors de sa mise en selle par exemple, ce dernier semble compenser le déséquilibre engendré en faisant contre-poids. Il serait donc intéressant de vérifier si il y a réellement un déplacement latéral du centre de gravité du cheval.

Or ces conditions d'enregistrement sont difficilement réalisables. Le voltigeur masquerait certains marqueurs, celui du thorax ou celui placé à la base de l'encolure par exemple, limitant ainsi beaucoup l'étendu de l'étude.

Les données obtenues lors de cette étude ne constituent qu'une approche de l'analyse du cheval de voltige. En effet, cet animal est observé ici dans des conditions se rapprochant le plus possible de ses conditions de travail. Il est longé à sa main habituelle, enrêné comme lors d'une épreuve sportive, et mené par son longeur. Le dispositif d'enregistrement est discret pour ne pas le perturber.

B/ LES RESULTATS : INTERPRETATION ET INTERETS

1/ Le galop sur le cercle :

Jusqu'à présent, toutes les études réalisées sur le cheval au galop ont été menées en ligne droite. Grâce à ce nouveau protocole, fiable et reproductible, le cheval a pu être filmé sur le cercle. La série de photos obtenue ne fournit pas de données nouvelles sur le galop lui-même mais montre que les données obtenues sont lisibles et exploitables. Elles permettent de décrire chaque étape de l'allure. Il en est de même pour les kinogrammes réalisés qui semblent similaires à ceux que l'on pourrait obtenir à partir d'un cheval filmé au galop en ligne droite.

2/ Le cheval de voltige :

L'analyse des résultats obtenus lors de l'étude cinématique peut aboutir à tirer certaines conclusions sur le galop des chevaux observés.

Les résultats obtenus sur l'observation de la vitesse montrent que celle-ci varie peu d'un cheval à l'autre ou d'un passage à l'autre (entre 4 et 4,5 ms). Toutefois un cheval sort du lot: EGINE qui galopait un peu plus vite que les autres (4,8 ms en moyenne). Mais ce cheval était plus jeune (9 ans), une femelle, et de plus venait juste de débiter son activité en voltige, beaucoup de particularités qui pourraient être à l'origine de cette différence. Il apparaissait aussi que DIAMOS est le cheval dont la vitesse était la plus stable alors que TURCO, lui était le moins constant dans son allure.

Les mouvements pendulaires de l'antérieur droit présentaient une amplitude importante autour de 50 degrés, mais de variation intra et inter individu faible. Les chevaux

effectuant la protraction maximale la plus importante (Beauty et EGINE) étaient aussi ceux dont l'amplitude de mouvement était la plus grande, ce qui paraît cohérent. Et il en était de même pour ceux dont les valeurs étaient les plus faibles c'est à dire Taxy et Diamos.

L'observation des mouvements pendulaires du postérieur droit montre que seuls Beauty et EGINE engagent suffisamment leur postérieur externe, la protraction maximale étant alors positive.

Par ailleurs, l'amplitude de mouvement du postérieur était très stable dans son ensemble.

L'observation des mouvements de la tête et ceux du bloc tête-encolure, montre qu'une grande variabilité existait d'un cheval à l'autre et d'un passage à l'autre. Toutefois, le cheval dont l'amplitude de mouvement de balancier du bloc était la plus importante est EGINE, ce qui peut sans doute être mis en parallèle avec le fait qu'elle galope plus vite.

3/ Les critères de jugement :

Pour ce qui est des mouvements du tronc, il apparaissait que Quitus et Papaz présentaient les mouvements les plus amples, ce qui s'explique peut-être par le fait qu'ils étaient aussi les chevaux les plus âgés mais d'autres raisons peuvent aussi exister.

La discipline sportive qu'est la voltige se trouvait confrontée à des difficultés induites par le manque de rigueur et de compréhension sur le jugement des chevaux lors de compétitions nationales. Les critères à apprécier n'étaient pas simples, nets et précis pour les équipes subissant la notation. Et ils n'étaient pas facilement observables pour des juges qui ne sont pas forcément des « hommes de cheval ».

Malgré des stages d'apprentissage suivi par les juges pour apprendre à observer ces critères, des erreurs de jugement persistaient lors de compétitions nationales, créant des désaccords entre juges et équipes de voltige. Par manque de connaissance sur la locomotion du cheval de voltige, cette discipline sportive ne disposait pas de critères de jugement

objectifs du cheval. Un des critères à observer était la «rondeur» du galop du cheval. Pour quelqu'un qui n'est pas forcément cavalier, ceci était peu accessible, pas facilement observable même avec des paramètres précis et un apprentissage pour l'observer plus aisément, ce n'est pas évident. De plus ce critère était très subjectif.

Cette étude a permis de mieux connaître la locomotion du cheval de voltige et de la décrire à travers des paramètres objectifs. A partir de ces connaissances et grâce à des discussions entre les longeurs, les voltigeurs, les entraîneurs et les juges, certains critères ont été standardisés.

Trois aspects de la locomotion du cheval de voltige ont notamment été précisés. Sachant que lors d'une compétition, le juge doit aussi noter le voltigeur et ne dispose que de quelques secondes pour observer le cheval, ces critères sont peu nombreux et facilement observables. Il s'agit de la vitesse, de l'engagement du postérieur externe et des mouvements du tronc et de l'encolure.

La vitesse peut être évaluée facilement par une personne qui possède un peu d'expérience. Elle ne doit pas être trop rapide ni trop lente et doit être régulière.

L'engagement du postérieur externe peut être apprécié en observant la position du sabot lors du posé du membre. Il doit dépasser la ligne verticale qui passe par l'angle de la hanche.

Les mouvements du tronc et de l'encolure doivent servir le voltigeur en lui fournissant du « rebond ». Le tronc et l'encolure doivent avoir des mouvements de balancier bien marqués, les déplacements verticaux du corps doivent être importants mais la tête ne doit pas trop plonger vers le bas (sinon le cavalier a une sensation de vide devant lui).

Durant cette étude, lors d'une séance de formation des juges, les performances de certains chevaux ont été appréciées et évaluées. Les notes figurent dans le tableau 3 . Il s'agit de notes moyennes données par l'ensemble des juges.

Nom du cheval	Note sur 10
Turco	8
Quitus	6 - 7
Saphir	5 - 7
Taxy	5 - 7
Beauty	5.5 - 6
Banco	5.5 - 6
Papaz	4 - 4.5

Tableau 3 : Notation des chevaux par les juges.

Ainsi, Turco effectue «un galop de qualité» d'après les juges. Or, selon cette étude, le galop de ce cheval n'est pas très régulier, il n'engage pas suffisamment son postérieur externe et les mouvements de balancier ne sont pas très marqués. Un décalage existe entre la théorie et le terrain.

Il faut savoir que cette étude ne peut pas servir de méthode pour évaluer les chevaux lors de leur travail car les données n'ont été récoltées qu'au cours d'une seule séance d'enregistrement. La reproductibilité des résultats à des jours différents n'a pas été testée. Un cheval peut effectuer des performances très variables selon des conditions externes et internes différentes. Ainsi aucunes généralités ne peuvent être tirées sur un essai. Une autre étude serait intéressante à réaliser pour évaluer la répétitivité des paramètres obtenus à des jours différents.

D'autre part, les données récoltées pour chaque cheval peuvent être influencées par le longeur. Même si celui-ci a été le même pour tous les chevaux pour justement éviter de biaiser les résultats, il n'est pas forcément neutre par rapport au cheval. Il peut modifier sa performance en le stimulant plus ou moins par exemple. Il serait donc intéressant de réaliser une autre étude pour évaluer l'influence du longeur sur le cheval de voltige.

CONCLUSION

L'étude cinématique des mouvements du cheval au galop sur un cercle est donc réalisable.

Des paramètres ont pu être relevés et analysés. Des résultats surtout descriptifs ont été obtenus sur : la vitesse, les mouvements pendulaires des membres et les mouvements verticaux et de balanciers de l'encolure et du thorax. A partir de ces premières observations, des critères de jugement simples et précis ont déjà pu être déterminés pour les épreuves nationales de voltige.

De nombreuses autres données restent à être exploitées comme toutes celles relatives aux mouvements du côté gauche de l'animal.

Ce protocole peut donc être réutilisé pour étudier le cheval soit lors de son utilisation dans d'autres disciplines tel qu'en dressage par exemple, soit pour pousser plus loin l'analyse du cheval de voltige. Quelques adaptations seraient alors certainement nécessaires, par exemple si l'étude cherche à analyser la locomotion du cheval lorsqu'il est travaillé avec un voltigeur sur son dos, la position des marqueurs devra être réétudiée.

Une base de données pourrait aussi être réalisée si un effectif de chevaux plus important pouvait être obtenu. Elle pourrait servir lors de la sélection de chevaux en apportant des critères spécifiques en relation avec les qualités requises pour cette discipline.

BIBLIOGRAPHIE

ABDEL-AZIZ, H.I. et KARARA, H.M. (1971). Direct linear transformation from comparator coordinates in object-space coordinates in close-range photogrammetry. In : *Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetry*, Urbana, Illinois, 1-18.

AUDIGIE, F., POURCELOT, P., DEGUEURCE, C., DENOIX, J.M., GEIGER, D., BORTOLUSSI, C. (1998). Assymetry in placement of bilateral skin markers on horses and effects of assymetric skin marker placement on kinematic variables. *Am. J. Vet. Res.* **vol. 59**, No 8, 938-944.

BACK, W., HARTMAN, W., SHAMHARDT, H.C., BRUIN, G., BARNEVELD, A. (1995). Kinematic response to a 70 day training period in trotting Dutch Warmbloods. *Equine Vet. J. Suppl.* **18**, 127-131.

BACK, W., SHAMHARDT, H.C., BARNEVELD, A. (1997). Kinematic comparison of the leading and trailing fore- and hindlimbs at the canter. *Equine Vet. J. Suppl.* **23**, 80-83.

BACK, W., VAN DEN BOGERT, A.J., VAN WEEREN, P.R., BRUIN, G., BARNEVELD, A. (1993). Quantification of the locomotion of Dutch Warmblood foals. *Acta Anat.* **146**, 141-147.

BARREY, E. (1999). Methods, Applications and Limitations of Gait Analysis in Horses. *The Veterinary Journal* **157**, 7-22.

BARREY, E., AUVINET, B., COUROUCE, A. (1995). Gait evaluation of race trotters using an accelerometric device. *Equine Vet. J. Suppl.* **18**, 156-160.

BARREY, E., BLANCHARD, G., ORANGE, F. (1993). Analyse cinématique du saut chez le cheval de concours hippique. Influence du niveau d'épreuve, de l'âge, du sexe, de la race, et de l'origine paternelle. *Recueil de Médecine Vétérinaire* **169** (1) : 37-43.

BARREY, E., LANDJERIT, B., WOLTER, R. (1991). Shock and vibration during the hoof impact on different tract surfaces. *Equine Exercise Physiology 3*, eds. S.G.B. Persson, A. Lindholm and L.B. Jeffcott, Davis, CA, ICEEP publications, 97-106.

BENOIT, E., BARREY, E., REGNAULT, J.C., BROCHET, J.L. (1993). Comparison of the damping effect of different shoeing by measurement of hoof acceleration. *Acta Anat.* **146**, 109-113.

BUCHNER, H.H.F., SAVELBERG, H.H.C.M., SCHAMHARDT, H.C., BARNEVELD, A. (1996). Limb movement adaptations in horses with experimentally induced fore- or hindlimb lameness. *Equine Vet. J.* **28**, 63-70.

- BUCHNER, H.H.F., SAVELBERG, H.H.C.M., SCHAMHARDT, H.C., BARNEVELD, A. (1995). Bilateral lameness in horses – A kinematic study. *Vet. Quart.* **17**, 103-105.
- BUCHNER, F., KASTNER, J., GIRTLER, D., KNEZEVIC, P.F. (1993). Quantification of hind limb lameness in the horse. *Acta Anat.* **146**, 196-199.
- CAPOZZO, A., LEO, T., PEDOTTI, A. (1975). A general computing method for the analysis of human locomotion. *J. Biomech.* **8**, 307-320.
- CLAYTON, H.M. (1986). Kinematic analysis of the gait of lame horses. *J. Equine Vet. Sc.* **6**, 70-78.
- CLAYTON, H.M. (1989). Terminology for the description of equine jumping kinematics. *J. Equine Vet. Sc.* **9**, 341-348.
- CLAYTON, H.M., COLBORNE, G.R., BURNS, T. (1995). Kinematic analysis of successful and unsuccessful attempts to clear a water jump. *Equine Vet. J. suppl* **18**, 166-169.
- DEGUEURCE, C., POURCELOT, P., AUDIGIE, F., DENOIX, J.M., GEIGER, D. (1997). Variability of the limb joint patterns of sound horses at trot. *Equine Vet. J. suppl.* **23**, 89-92.
- DEUEL, N.R. (1995). Dressage canter kinematics and performances in an Olympic Three-day event. In : *Proceedings of 46th Annual meeting of the European Association for Animal Production, Horse commission H-2.3*, September, Prague, 4-7.
- DEUEL, N.R., SCHAMHARDT, H.C., MERKENS, H.W. (1995). Kinematics of induced reversible hind and forehoof lameness in horses at the trot. *Equine Vet. J. suppl.* **18**, 147-151.
- DREVEMO, S., DALIN, G., FREDRICSON, I., HJERTEN, G. (1980). Equine locomotion :1. The analysis of linear and temporal stride characteristics of trotting Standardbreds. *Equine Vet. J.* **12**, 60-65.
- FREDRICSON, I., DALIN, G., DREVEMO, S., HJERTEN, G. (1975). A biotechnical approach to the geometric design of racetracks. *Equine Vet. J.* **7**, 91-96.
- FREDRICSON, I., DREVEMO, S. (1972). Methodological aspects of kinematics of the joints in the forelimbs of fast-moving horses. *Acta vet. Scand. Suppl.* **37**, 93-136.
- GALISTEO, A.M., CANO, M.R., MORALES, J.L., MIRO, F., AGUERA, E. (1997). Kinematics in horses at the trot before and after an induced forelimb supporting lameness. *Equine Vet. J.* **23**, 97-101.
- HILDEBRAND, M. (1965). Symmetrical Gaits of Horses. *Science* **191**, 701-708.
- HOLMSTRÖM, M., FREDRICSON, I., DREVEMO, S. (1994). Biokinematic effect of collection in the elite dressage horse trot. *Quantitative studies on conformation and trotting gaits in the Swedish Warmblood riding horse*, Thesis. Pp. VI-7, Dösjebro (SW), Hippo Vet AB.

HOLMSTRÖM, M., FREDRICSON, I., DREVEMO, S. (1994). Biokinematic differences between riding horses judged as good and poor at the trot. *Equine Vet. J. Suppl.* **17**, 51-56.

JEFFCOTT, L.B., ROSSDALE, P.D., FREESTONE, J., FRANCK, C.J., TOWERS-CLARK, P.F. (1982). An assessment of wastage in Thoroughbred racing from conception to 4 years of age. *Equine Vet. J.* **14**, 185-198.

JOHNSTON, C., ROEPSTORFF, L., DREVEMO, S., KALLINGS, P. (1996). Kinematics of the distal hindlimb during stance phase in the fast trotting Standardbred. *Equine Vet. J.* **28**, 263-268.

LEACH, D.H. (1987). Locomotion of the Athletic Horse. *Equine Exercise Physiology 2*, eds. J.R. Gillespie and N.E. Robinson, Davis, ICEEP publications, 516-535.

LEACH, D.H., CYMBALUK, N.F. (1986). Relationships between stride length, stride frequency, velocity, and morphometrics of foals. *Am. J. Vet. Res.* **47** (9), 2090-2097.

LEACH, D.H., ORMROD, K. (1984). The technique of jumping a steeplechase fence by competing event-horses. *Appl. Anim. Behav. Sc.* **12**, 15-24.

LEACH, D.H., SPRIGINGS, E.J., LAVERTY, W.H. (1987). Multivariate statistical analysis of stride-timing measurements of nonfatigued racing Thoroughbreds. *Am. J. Vet. Res.* **48** (5), 880-888.

MAREY, E.J. (1873). La machine animale : locomotion terrestre et aérienne, ed. E.J. Marey, pp.145-186. 2^o édition. Coll. Bibliothèque Science Internationale, Paris.

MARTINEZ-DEL CAMPO, L.J., KOBLUK, C.N., GREER, N., TRENT, A.M., STONER, L.J., WICKSTROM, L., LOCH, D. (1991). The Use of High-Speed Videography to Generate Angle-Time and Angle-Angle Diagrams for the Study of Equine Locomotion. *Vet. Comp. Orthop. Traumat.* **4**, 120-131.

MUYBRIDGE, E. (1887). Muybridge's complete human and animal locomotion vol.3, republication de Animal locomotion. New-York, Dover Publication.

PEHAM, C., SCHEIDL, M., LICKA, T. (1996). A method of signal processing in motion analysis of the trotting horse. *J. Biomech.* **29** (8), 1111-1114.

POURCELOT, P., DEGUEURCE, C., AUDIGIE, F., DENOIX, J.M. (1996). Analyse cinématique tridimensionnelle de la locomotion du cheval : application à la détection des troubles locomoteurs. In : 22^{eme} Journée de la Recherche Equine, Paris, 28 Février 1996, 54-67.

POURCELOT, P., AUDIGIE, F., DEGUEURCE, C., DENOIX, J.M. (1997). E.K.A.S – An equine analysis system for clinical gait analysis. *J. Equine Vet. Sc.* **17** (9), 482.

RATZLAFF, M.H., SCHINDELL, R.M., WHITE, K. (1985). The interrelationships of stride lengths and stride times to velocities of galloping horses. *J. Equine Vet. Sc.* **5** (5), 279-283.

ROSSDALE, P.D., HOPES, R., WINGFIELD DIGBY, N.J., OFFORD, K. (1985). Epidemiological study of wastage among racehorses 1982 and 1983. *The Veterinary Record* **11**, 66-69.

VAN DEN BOGERT, A.J., JANSEN, M.O., DEUEL, N.R. (1994). Kinematics of the hind limb push-off in elite show jumping horses. *Equine Vet. J. Suppl.* **17**, 80-86.