

Table des matières

I. INTRODUCTION ET OBJECTIFS DE L'ETUDE	- 7 -
I.1 POSITION DU PROBLEME.....	- 8 -
I.2 OBJECTIFS DE L'ETUDE.....	- 11 -
I.3 TERMINOLOGIE UTILISEE DANS L'ETUDE DU SAUT.....	- 12 -
I.3.1 Définition générale des allures.....	- 12 -
I.3.2 Le galop.....	- 13 -
I.3.3 Les obstacles.....	- 13 -
I.3.4 Le saut.....	- 13 -
I.3.5 Phase intermédiaire entre deux obstacles.....	- 14 -
 II. MATERIEL ET METHODE	- 15 -
II.1 DISPOSITIF EXPERIMENTAL.....	- 16 -
II.1.1 Dispositif d'enregistrement.....	- 16 -
II.1.2 Système vidéo.....	- 17 -
II.1.3 Structure de calibration.....	- 18 -
II.1.4 Procédé d'acquisition.....	- 19 -
II.2 DEPOUILLEMENT DES FILMS.....	- 20 -
II.2.1 Numérisation des films.....	- 20 -
II.2.2 Reconstitution 3-D et obtention des courbes.....	- 20 -
II.3 PROTOCOLE EXPERIMENTAL.....	- 22 -
II.3.1 Les sujets.....	- 22 -
II.3.2 Equipements des chevaux.....	- 22 -
II.3.3 Enregistrement des chevaux à l'obstacle.....	- 24 -
II.4 METHODE D'ANALYSE DES DONNEES.....	- 25 -
II.4.1 Variables étudiées.....	- 25 -
II.4.2 Détermination des différentes phases du saut.....	- 26 -
II.4.3 Analyse des données.....	- 26 -

III. ETUDE DES AMPLITUDES DE FLEXION ET D'EXTENSION DU DOS DU CHEVAL LORS D'UN SAUT DE PUCE	- 27 -
III.1 DESCRIPTION QUALITATIVE DES MOUVEMENTS DE FLEXION-EXTENSION DU DOS.....	- 28 -
III.1.1 Appel du premier obstacle.....	- 28 -
III.1.2 Saut du premier obstacle.....	- 28 -
III.1.3 Réception du premier obstacle – Appel du second obstacle.....	- 28 -
III.1.4 Saut du second obstacle.....	- 29 -
III.1.5 Réception du second obstacle.....	- 29 -
III.1.6 Foulée de reprise.....	- 29 -
III.2 DESCRIPTION QUANTITATIVE ET VARIABILITE DES MOUVEMENTS DE FLEXION-EXTENSION DU DOS.....	- 31 -
III.2.1 Description quantitative.....	- 31 -
III.2.2 Variabilité.....	- 31 -
III.3 COMPARAISON AVEC LE SAUT D'UN OBSATCLE SIMPLE.....	- 31 -
III.3.1 Saut d'un vertical d'un mètre.....	- 31 -
III.3.2 Saut d'un vertical d'un mètre cinquante.....	- 33 -
IV. DISCUSSION.....	- 39 -
IV.1 EVALUATION DES ERREURS LIEES A LA METHODE.....	- 40 -
IV.1.1 Le volume d'étude calibré.....	- 40 -
IV.1.2 Précision et résolution.....	- 41 -
IV.1.3 Fréquence d'acquisition.....	- 41 -
IV.1.4 Erreurs liées au traitement informatique.....	- 42 -
IV.1.5 Les marqueurs cutanés.....	- 42 -
IV.2 EVALUATION ET JUSTFICATION DES CONDITIONS DE SAUT.....	- 44 -
IV.2.1 Le saut en liberté.....	- 44 -
IV.2.2 La ligne d'obstacle.....	- 44 -
IV.2.3 Validité des sauts.....	- 44 -
IV.2.4 Représentativité des échantillons.....	- 45 -

IV.3 LES MOUVEMENTS DU DOS LORS DU SAUT DE PUCE.....	- 46 -
IV.3.1 Le saut en général.....	- 46 -
IV.3.2 Particularités de la phase intermédiaire du saut de puce.....	- 47 -
CONCLUSION.....	- 49 -
BIBLIOGRAPHIE.....	- 51 -

Index des Figures

Figure 1 : Décomposition des phases d'appui des membres sur deux foulées de galop.....	- 13
-	
Figure 2 : Illustration du poser des membres lors du franchissement d'une combinaison en saut de puce.....	- 14 -
Figure 3 : Schéma du dispositif d'enregistrement.....	- 16 -
Figure 4 : Vue de l'aire d'expérimentation lors d'un enregistrement.....	- 17 -
Figure 5 : Caméra rotative sur son trépied, entourée de ses deux projecteurs.....	- 18 -
Figure 6 : Structure métallique de calibration de 10M x 3M x 3M, munie de marqueurs réfléchissants.....	- 19 -
Figure 7 : Etapes de la reconstitution 3-D avec les images obtenues des films des caméras droite et gauche.....	- 21 -
Figure 8 : Cheval équipé de ses marqueurs.....	- 23 -
Figure 9 : Position des marqueurs utilisés pour l'étude du dos.....	- 24 -
Figure 10 : Les cinq marqueurs dorsaux et matérialisations des angles thoracique, thoraco-lombaire et lombo-sacral.....	- 25 -
Figure 11 : Exemple de tracé du dos lors du saut de puce.....	- 30 -

Index des tableaux

Tableau 1 : Présentation et caractéristique des chevaux inclus dans l'étude.....	- 22 -
Tableau 2 : Moyennes par cheval et sur les cinq chevaux et variabilité des amplitudes de flexion-extension du dos lors du passage du premier obstacle de la combinaison en saut de puce.....	- 34 -
Tableau 3 : Moyennes par cheval et sur les cinq chevaux et variabilité des amplitudes de flexion-extension du dos lors du passage du second obstacle de la combinaison en saut de puce.....	- 35 -
Tableau 4 : Comparaison des moyennes des amplitudes de flexion-extension du dos des cinq chevaux entre un vertical simple à un mètre et une combinaison en saut de puce à un mètre.....	- 36 -
Tableau 5 : Comparaison des moyennes des amplitudes de flexion-extension du dos des cinq chevaux entre un vertical simple à un mètre cinquante et une combinaison en saut de puce à un mètre.....	- 37 -
Tableau 6 : Précision et résolution des méthodes d'enregistrement à caméras fixes et rotatives sur un champ calibré de dix mètres.....	- 41 -

I. INTRODUCTION ET OBJECTIFS DE L'ETUDE.

I.1 POSITION DU PROBLEME.

Décrit comme la plus noble conquête de l'homme, le cheval fut de tous les dévouements. Il serait impossible d'être exhaustif quand à ses qualités vu le rôle immense que cet animal a joué dans l'évolution des sociétés humaines. En revanche, il convient de souligner que toute la médecine des animaux lui est redevable, le cheval étant à l'origine même de l'enseignement vétérinaire. Reconnaissons à Claude Bourgelat le mérite d'avoir fondé la première école vétérinaire, mais accordons au cheval celui de l'avoir inspiré, car c'est pour le soigner que les écoles d'Europe et d'Amérique ont vu le jour à la fin du XVIII^{ième} et tout au long du XIX^{ième} siècles.

Indispensable au bon fonctionnement économique il était alors un animal précieux qui méritait une grande attention, le développement des productions animales finira par le reléguer à l'arrière plan. Emboîtant le pas, les sciences vétérinaires se consacrent alors à l'optimisation de la rentabilité des élevages bovins, porcins et autres. Durant la même période, la place croissante des animaux de compagnie et l'intérêt qu'ils suscitent auprès du monde vétérinaire amoindriront l'effort porté sur la médecine équine.

Mais sa répartition au sein du paysage culturel français démontre le lien étroit nous unissant encore avec cet animal. Compagnon des travaux agricoles où il revient en première ligne (débardage forestier, maraîchage, portage), moyen de transport encore utilisé pour la garde de troupeaux, le cheval trouve aujourd'hui sa place dans une société où les loisirs prennent une place grandissante. Ainsi, il est impliqué dans des disciplines sportives variées (courses, saut d'obstacle, endurance, ...) et est devenu un athlète accompli soumis dorénavant aux lois de la compétition. Depuis le début des années 70, les écoles et instituts vétérinaires intensifient leurs efforts de recherche dans le domaine médical et chirurgical mais encore dans l'avènement de nouveaux domaines tels l'alimentation ou encore l'éthologie.

Afin de faire atteindre aux chevaux les plus hauts niveaux de performance, trois nécessités sont à concilier qui orientent les travaux actuels en physiologie sportive équine : sélectionner, entraîner et accroître leur longévité.

Concernant le saut d'obstacle, la sélection des jeunes chevaux est actuellement basée sur les performances en compétition relevant de données objectives ainsi que sur des épreuves de « Modèles et allures » où les animaux sont jugés suivant des critères subjectifs non

standardisés tels la conformation des chevaux et leurs déplacements aux trois allures. Il paraît donc intéressant de développer des méthodes quantitatives afin d'appréhender de façon objective, et in vivo, le mouvement du cheval s'agissant le plus souvent d'animaux de grandes valeurs.

Deux approches paraissent intéressantes (Powers et Harrisson 1999) :

- la cinématique avec plus particulièrement les techniques de cinématographie et de vidéographie qui permettent une analyse du mouvement ou de l'allure dans son ensemble dans l'espace au cours du temps. La plupart des études actuelles ont utilisé des techniques vidéographiques bidimensionnelles et concernent des chevaux montés (Barrey et Calloux 1995 ; Clayton et Barlow 1991 ; Leach et Ormrod 1984). Une étude cinématique tridimensionnelle a été menée concluant que des chevaux de différents niveaux de compétition présentaient des variations dans les mouvements de leur dos lors du franchissement d'un obstacle de hauteur moyenne. Cette étude a également permis de développer un système cinématique tridimensionnelle à caméras rotatives adapté à l'analyse de la locomotion du cheval sur de grands champs d'investigation (Cassiat-Morrisset 2004).
- La cinétique qui permet d'étudier les causes du mouvement par la mesure des forces appliquées au corps à l'aide de plaques dynamométriques posées au sol ou encore la mesure des accélérations par des capteurs fixés sur le cheval tel l'accéléromètre utilisée dans la méthode *Equimétrie* développée par Barrey *et al.* (1994). Cette méthode fut utilisée pour la sélection des étalons nationaux et démontre que les héritabilités les plus fortes concernent l'aptitude au saut (Barrey *et al.* 2002). Barrey et Galloux (1997) ont enregistré les accélérations dorso-ventrales sous le sternum des chevaux et montré que les mauvais chevaux présentaient un pic d'accélération verticale plus fort à l'appel que les bons chevaux.

L'entraînement suppose l'amélioration du geste sportif qui impose de connaître la nature des interventions musculaires et des déplacements articulaires mis en jeu lors du mouvement

(Denoix 1989). La cinématique, couplée à l'électromyographie, permet de préciser ces paramètres. Peham *et al.* (2001) évaluent l'activité du muscle longissimus du thorax sur des mouvements dorsaux induits par un opérateur. Robert *et al.* (2001) décrivent l'intervention des muscles du tronc dans la mécanique du dos du trotteur démontrant leur rôle de contrôle de la rigidité de la colonne au détriment de l'induction des mouvements. Actuellement, seule une étude descriptive renseigne sur les interventions musculaires en relation avec la biomécanique dorsale au cours du saut d'un obstacle simple (Denoix 1988).

De même, l'augmentation de la longévité des chevaux de sport passe par l'économie de l'appareil locomoteur et une meilleure connaissance des forces et des contraintes subies par les systèmes ostéo-articulaires et musculo-tendineux au cours des divers exercices de l'entraînement à la compétition (Denoix 1989). La cinématique et la cinétique trouvent là encore leur application. Meershoek *et al.* (2001) ont étudié la cinématique et les réactions au sol du membre antérieur à la réception d'un obstacle dont la hauteur varie et en tirent des conclusions quand aux contraintes tendineuses subies. Les études *in vitro* offrent un complément indispensable, Denoix (1999) décrit les relations entre la biomécanique dorsale et son anatomie fonctionnelle sur des segments vertébraux isolés.

Or, l'intensité et la répartition des séances d'obstacle posent un problème dans la préparation d'un cheval de saut d'obstacle comme de concours complet. Les appareils ostéo-articulaires et tendineux sont alors exposés à de fortes contraintes mécaniques qui, si elles sont mal gérées par l'entraîneur, peuvent interrompre prématurément la carrière du cheval. Par ailleurs, pour franchir un obstacle, le cheval soumet sa colonne vertébrale à des amplitudes de flexion-extension importantes (Jeffcott et Dalin 1980 ; Thoulon 1991). Ce type de mouvements expose sa colonne thoraco-lombaire à des lésions plus fréquentes qui sont le plus souvent à l'origine de contre-performances (Jeffcott 1980).

Le saut de puce correspond à une combinaison de deux obstacles suffisamment rapprochés pour que le cheval ne prenne qu'un seul appui entre eux. Il semble présenter divers intérêts pour l'entraînement de ces chevaux ; les contraintes qu'il impose sont inférieures à celles qui apparaissent sur un obstacle simple, mais il permet de développer plus efficacement certains gestes capitaux dans l'exécution du saut (Denoix 1988). Or, ces considérations ne reposent que sur des données qualitatives, aucune donnée objective quantifiée sur les spécificités de cet exercice n'ayant été fournie.

I.2 OBJECTIFS DE L'ETUDE.

Cette étude s'inscrit dans un projet mené par l'UMR de Biomécanique et Pathologie Locomotrice du Cheval en collaboration avec le CEZ de Rambouillet. L'objectif de ce projet est de fournir une analyse détaillée de la cinématique du saut du cheval et d'évaluer l'intérêt de la cinématique tridimensionnelle dans l'appréciation du sauteur.

Notre travail se propose plus spécifiquement :

- d'objectiver les amplitudes de flexion et d'extension du dos du cheval lors du franchissement d'une combinaison d'obstacle de type saut de puce.
- de comparer ces données aux amplitudes décrites lors du franchissement d'un obstacle simple de même hauteur et de hauteur supérieure.

Ce travail est associé à trois autres études qui ont permis de décrire les mouvements articulaires des membres antérieurs (Ryckelynck 2003), postérieurs (Domont 2004) et la cinématique des mouvements du dos (Cassiat-Morrisset 2004) lors du franchissement d'un obstacle simple.

I.3 TERMINOLOGIE UTILISEE DANS L'ETUDE DU SAUT.

Afin de faciliter la compréhension du travail et en accord avec les études précédentes, nous utiliserons la terminologie définie par Clayton (1989) offrant une terminologie claire pour décrire le saut du cheval sur un obstacle simple ou une combinaison.

I.3.1 Définitions générales des allures.

Ce sont les mouvements spécifiques du cheval qui se déplace par action successive ou combinée de ses membres selon un ordre chronologique précis en définissant des cycles. La réalisation d'un cycle complet détermine une foulée.

La foulée se divise en une phase d'appui où le sabot est en contact avec le sol et de soutien également appelée phase pendulaire, durant laquelle le sabot ne touche plus le sol :

- La phase d'appui commence avec le poser du pied. La première partie de la phase d'appui est l'amortissement. Les articulations ont alors tendance à se fermer sous le poids du corps. Le moment où le membre devient vertical correspond au milieu de l'appui, c'est la phase de soutien. La phase d'appui se termine avec la propulsion : le membre est alors en arrière de la verticale et les articulations s'ouvrent.
- La phase de soutien commence avec le lever du pied. La première partie de la phase de soutien correspond au ramener. Les articulations se fléchissent. Lorsque le membre passe en avant de la verticale, la phase d'embrassée débute, les articulations s'ouvrent à nouveau.

Considérant les 4 membres du cheval, ce dernier sera considéré en phase d'appui dès qu'un de ses membres est en contact avec le sol et en phase de suspension lorsque aucun de ses membres ne touche le sol.

I.3.2 Le galop.

C'est l'allure définie pour franchir la combinaison d'obstacle dans notre étude. C'est une allure sautée, dissymétrique, à trois temps d'appui suivis d'un temps de suspension.

On définit un galop par le latéral droit ou le latéral gauche suivant l'antérieur qui se pose en dernier et le plus loin dans l'espace. Ainsi, on peut distinguer chaque paire de membre : le membre dit directeur qui se pose en avant et en dernier par rapport au membre controlatéral considéré comme le membre non directeur (fig 1).

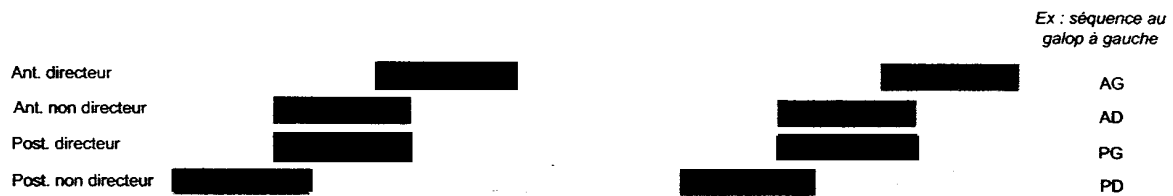


Figure 1 : Décomposition des phases d'appui des membres sur deux foulées de galop.

I.3.3 Les obstacles.

Un vertical correspond à un obstacle constitué d'une seule barre ou d'un ensemble de barres alignées dans le même plan vertical dont la hauteur peut varier mais dont la largeur est fixe et négligeable.

Un obstacle s'étendant à la fois en hauteur et en largeur est dénommé oxer. Il prend le qualificatif d'oxer carré lorsque sa hauteur est égale à sa largeur (à opposer à l'oxer ascendant où la hauteur de la seconde barre est supérieure à celle de la première).

I.3.4 Le saut.

Les foulées de galop avant le saut sont qualifiées de foulée d'abord et les foulées après le saut sont des foulées de reprise. Par convention, chaque foulée débute par le poser du membre

postérieur non directeur et se termine par le poser suivant du même membre. Les foulées d'abord sont numérotées dans le sens décroissant vers l'obstacle ; les foulées de reprise sont notées dans un sens croissant à partir de celui-ci.

Après la phase de suspension de la dernière foulée d'abord, le saut se décompose en trois parties :

- l'appel : phase d'appui des postérieurs avant l'obstacle ;
- la suspension ou planer : phase aérienne pendant laquelle aucun membre n'est au sol ;
- la réception : phase d'appui des postérieurs après l'obstacle.

La première foulée de reprise après le saut débute par le poser du premier postérieur au sol.

I.3.5 Phase intermédiaire entre deux obstacles.

Les foulées entre deux obstacles successifs sont dites foulées intermédiaires. Dans notre étude, la combinaison d'obstacle ne permet pas de foulée intermédiaire. On ne dénombre que 4 impacts de membres entre les deux obstacles ; le cheval se réceptionne avec ses antérieurs et sera considéré en phase d'appel du second obstacle dès que ses postérieurs touchent le sol (fig. 2).

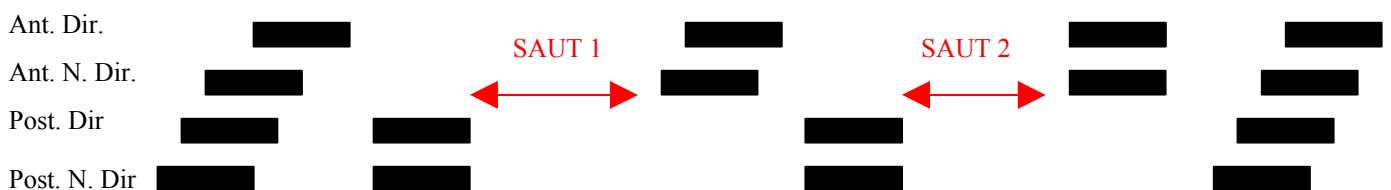


Figure 2 : Illustration du poser des membres lors du franchissement d'une combinaison en saut de puce. Ant. Dir. = antérieur directeur, Ant. N. Dir = antérieur non directeur, Post Dir = postérieur directeur, Post. N. dir. = postérieur non directeur.

II. MATERIEL ET METHODE.

II.1 DISPOSITIF EXPERIMENTAL.

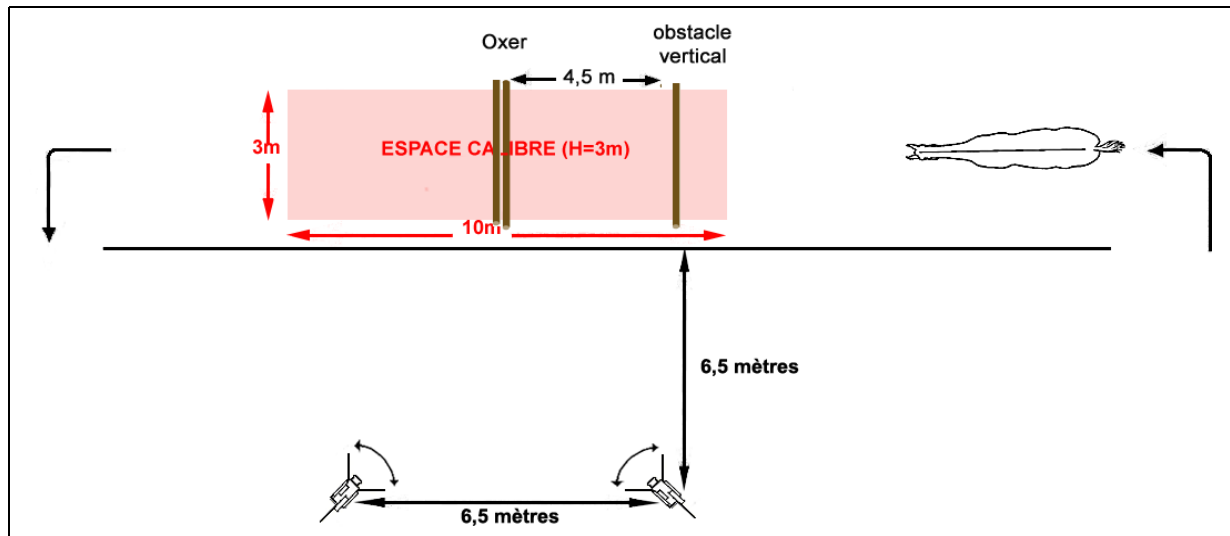


Figure 3 : Schéma du dispositif d'enregistrement.

II.1.1 Dispositif d'enregistrement.

Les enregistrements se sont déroulés à l'intérieur d'un manège couvert, avec un revêtement en sable, mesurant 60 mètres de long sur 30 mètres de large. La piste d'obstacle était une ligne droite installée sur la longueur du manège et délimitée d'un côté par le pare botte du manège et de l'autre par une longe noire qui ne masquait ni les chevaux, ni les éléments se trouvant dans le couloir.

Le dispositif d'enregistrement était située au centre de la piste et représentait une longueur de 10 mètres. Deux obstacles de 90 centimètres et 1 mètre de hauteur, distants de 4,50 mètres, furent positionnés au centre de cette aire. Les deux étaient formés de barres simples de 4 mètres de long et de couleur foncée (Fig.3).

Sur le haut du mur du manège était placé un marqueur fixe de référence (diamètre 38 mm) recouvert de scotch réfléchissant (Schotchlite, 25 mm, 3M) afin de définir l'orientation des caméras sur chaque image des films pour la reconstitution ultérieure.

Une ampoule de synchronisation était suspendue dans l'aire de saut. Elle était allumée à chaque passage filmé d'un cheval à l'abord du second obstacle (Fig. 4).



Figure 4 : Vue de l'aire d'expérimentation lors d'un enregistrement. De part et d'autre se trouvent les caméras rotatives manipulées par des opérateurs qui suivent le cheval à l'aide d'un écran de contrôle. En arrière plan, un cheval effectue un saut dans le couloir d'obstacle délimité le long du mur du manège.

II.1.2 Système vidéo.

Deux caméras rotatives (Sony CCD-TR3100E) étaient placées au centre du manège à 6,5 mètres de la piste et espacées entre eux de 6,5 mètres. Chaque caméra était équipée de 2 projecteurs de 500 Watts placés sous la lentille et solidaire de la caméra. L'ensemble était fixé sur un trépied de 2 mètres de haut (Slick 505 QF). Ce trépied permettait à la caméra un degré de rotation autour de son axe vertical. Un manche fixé sur le trépied permettait de pivoter l'ensemble autour de cet axe (Fig 5).

Les caméras étaient reliées à des moniteurs de contrôle qui retransmettaient l'image vue par les caméras au moment de l'acquisition des enregistrements. Les caméras étaient également connectées à des postes informatiques dotés d'une carte vidéo de résolution 768 x 576 pixels et de 256 niveaux de gris.

L'autofocus était ôté pour éviter les modifications de netteté de l'image ; le zoom était réglé pour filmer un champ de 6-7 mètres de long sur la piste lorsque les caméras étaient perpendiculaires à celle-ci. La vitesse d'obturation des caméras est élevée ($1/1750^{\text{ième}}$ de seconde) pour éviter le flou cinétique.

Le réglage du contraste des caméras était fait manuellement de manière à obtenir une visibilité des marqueurs optimale sur un fond noir, contraste renforcé par la lumière des projecteurs sur les marqueurs.



Figure 5 : Caméra rotative sur son trépied, entourée de ses 2 projecteurs.

II.1.3 Structure de calibration.

Elle était représentée par une structure géométrique résultant de l'assemblage de 8 cadres métalliques de 2,5 m x 1,5 m portant des tiges métalliques de 3 mètres de haut et de 2

centimètres de diamètre. Cette structure portait 36 marqueurs formés chacun d'une bande de scotch réfléchissant de 2,5 centimètres enroulée autour des tiges (Fig. 6).

Les coordonnées tridimensionnelles des marqueurs étaient connues et mesurées. Cette structure était filmée par chacune des caméras placées dans la position choisie pour l'expérience, elle définit ainsi une référence spatiale permettant la Transformation Linéaire Directe (Abdel-Aziz et Karara 1971). Les dimensions de la structure (10 mètres de long, 3 mètres de large, 3 mètres de haut) permettaient de calibrer la zone allant de l'appel du premier obstacle à la première foulée de galop de reprise après le second obstacle. Son horizontalité était contrôlée par des niveaux à bulles. Cette structure fut ensuite retirée et les obstacles sont installés sur la portion de piste calibrée.

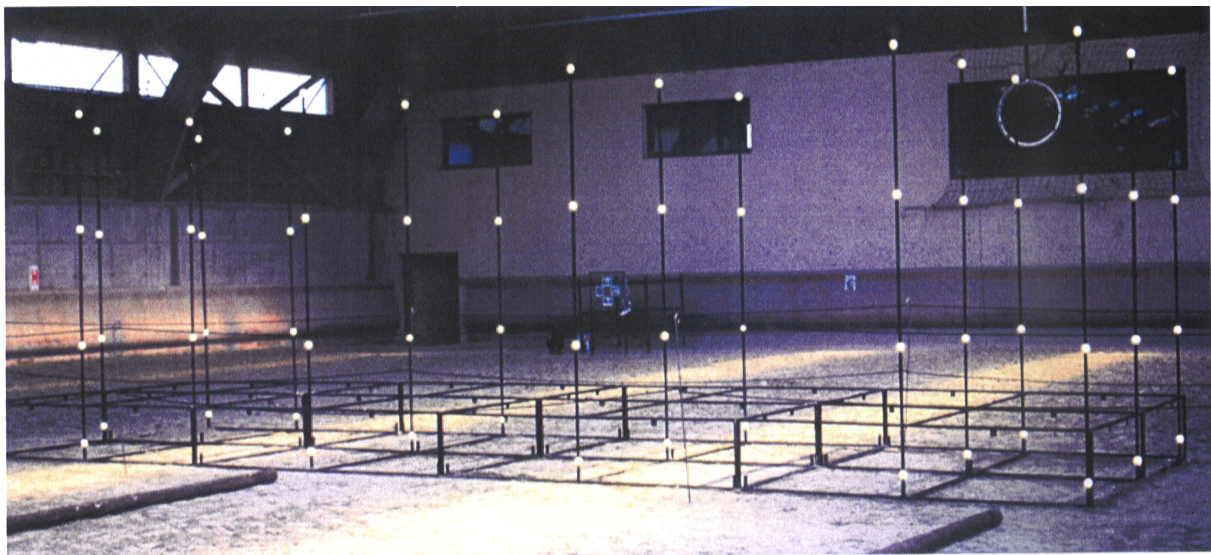


Figure 6 : Structure métallique de calibration de 10 m x 3 m x 3 m, munie de marqueurs réfléchissants.



II.1.4 Procédé d'acquisition.

Un opérateur placé à chacune des caméras filmait le cheval dans son déplacement en pivotant la caméra et en le suivant sur un écran de contrôle. L'opérateur devait veiller à garder le cheval au centre du champ de la caméra tout en gardant présent le marqueur de référence sur l'image.

Le passage d'un cheval se déplaçant de la droite vers la gauche était filmé comme suit : Au début, la caméra était fixe et positionnée de sorte que le marqueur de référence soit situé en haut à gauche de l'image. Lorsque le cheval arrivait dans le champ de la caméra et se trouvait au centre de l'image, l'opérateur pivotait la caméra pour le maintenir au centre de l'image durant son déplacement. Le marqueur de référence passait alors de la limite gauche à la limite droite de l'image. Alors, la caméra était maintenue fixe et filmait le sujet quittant son champ de vision.

II.2. DEPOUILLEMENT DES FILMS.

II.2.1 Numérisation des films.

Les enregistrements vidéos étaient numérisés en direct sur les ordinateurs connectés aux caméras. A chaque poste informatique, un opérateur démarrait la numérisation lorsque le cheval arrivait dans le champ de la caméra et l'arrêtait lorsqu'il en sortait. Cette numérisation pouvait également s'effectuer au laboratoire à l'aide d'enregistrements effectués sur cassettes vidéos SONY Hi-8.

II.2.2 Reconstitution 3-D et obtention des courbes.

Les positions des marqueurs sur le cheval et les obstacles étaient relevées de façon semi-automatique image par image à l'aide du système E.K.A.S. (Equine Kinematics Analysis

System) développé pour l'étude des boiteries du cheval avec des caméras fixes (Pourcelot *et al.* 1997) et adapté à l'utilisation des caméras rotatives (Pourcelot *et al.* 2001) (Fig. 7).

Cette opération fut réalisée avec la structure de calibration et pour chaque saut de chaque cheval avec les deux caméras. On obtient ainsi des coordonnées bidimensionnelles des marqueurs pour chacune des caméras. La reconstitution 3-D de la trajectoire des marqueurs était effectuée à l'aide de la technique de transformation linéaire directe (DLT) d'Abdel-Aziz et Karara (1971).

Tous les enregistrements étaient synchronisés par la détection d'un repère temporel : la première image où l'ampoule est allumée sur les deux films. Un filtrage à 10 Hertz est réalisé afin de supprimer les signaux dont la fréquence est supérieure et correspondant au bruit de fond.

Le logiciel ANALYSEUR permettait l'élaboration des courbes de décours angulaire en fonction de la position du garrot.

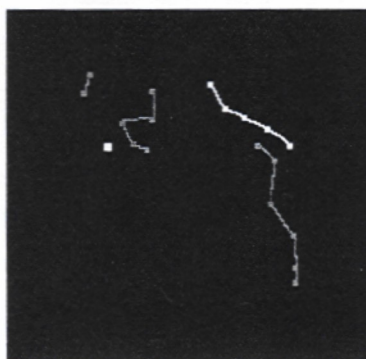


Figure 7 : Etapes de la reconstitution 3D avec les images obtenues des films des caméras droite et gauche.

II.3 PROTOCOLE EXPERIMENTAL.

II.3.1 Les sujets.

L'étude a porté sur un effectif de cinq chevaux Selle Français de la section hippique du Centre d'Etudes Zootechniques de Rambouillet (Tableau 1). Leur niveau au saut d'obstacle est bon, les chevaux sortant en compétition en seconde catégorie nationale.

L'âge moyen est de 9,6 ans $\pm$ 2,1 ; la hauteur moyenne des chevaux est de 168,7 cm $\pm$ 8,2 cm au garrot ; le poids moyen est de 567 kg $\pm$ 54 (Cassiat-Morrisset 2004).

CHEVAUX	RACE	SEXE	AGE (ans)	TAILLE AU GARROT (cm)	PERIMETRE THORACIQUE (cm)	POIDS VIF (kg)
Ascot d'Elle (AE)	SF	Mâle	12	163	190	521
Belle de Youx (BY)	SF	Femelle	11	159	195	530
Crazy Horse (CH)	SF	Hongre	10	175	205	621
Fumay (FU)	SF	Hongre	7	178	205	630
Effutée (EF)	SF	Femelle	8	164	192	533

Tableau 1 : Présentation et caractéristiques des chevaux inclus dans l'étude.

II.3.2 Equipements des chevaux.

Les chevaux étaient équipés de 19 marqueurs positionnés en regard de repères anatomiques précis sur le côté gauche et la ligne du dessus (Audigié *et al.* 1999 ; Cassiat-Morrisset 2004 ; Pourcelot *et al.* 1997) (Fig. 8). Les marqueurs étaient recouverts de scotch réfléchissant (Scotchlite 7610, 25 mm, 3M). Les marqueurs placés sur le dos étaient sphériques (diamètre 38 mm) et fixés sur un support en polystyrène de 1 cm de haut. Les autres marqueurs sur le restant du corps étaient hémisphériques. Les marqueurs positionnés directement sur le poil de

l'animal étaient collés à l'aide d'un scotch double-face alors que les marqueurs sur les sabots étaient fixés avec de la colle thermofusible.

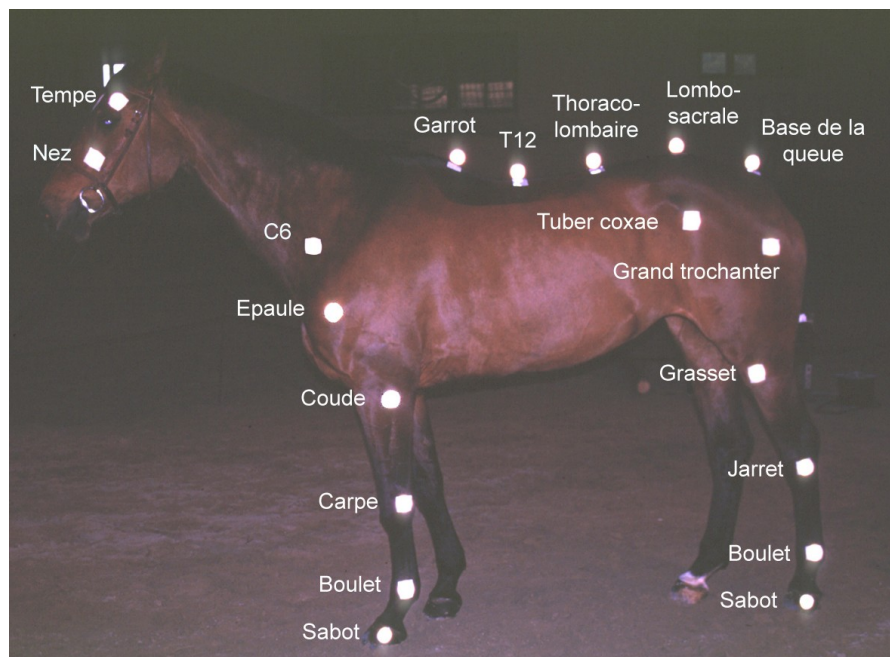


Figure 8 : Cheval équipé de ses marqueurs.

Seuls certains marqueurs ont été utilisés dans cette étude (Fig. 9). Il s'agit des cinq marqueurs du dos et des deux marqueurs du sabot qui étaient positionnés ainsi :

1. Sommet du garrot (5^{ième} ou 6^{ième} vertèbre thoracique).
2. 12^{ième} ou 13^{ième} vertèbre thoracique.
3. Jonction thoraco-lominaire (18^{ième} vertèbre thoracique ou 1^{ière} vertèbre lominaire).
4. Sommet du tuber sacrale.
5. Jonction sacrocaudale.
6. Paroi latérale du sabot antérieur gauche en regard de l'articulation interphalangienne proximale.

7. Paroi latérale du sabot postérieur gauche en regard de l'articulation interphalangienne proximale.

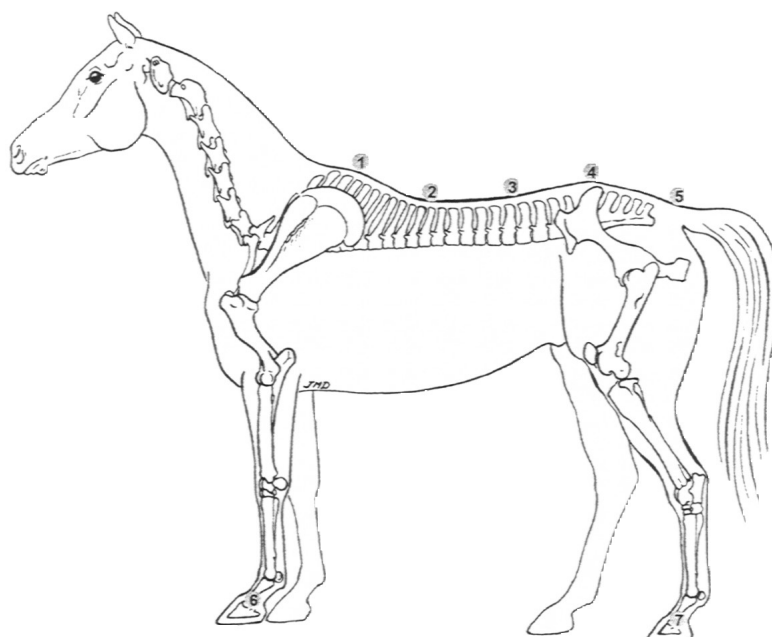


Figure 9 : Position des marqueurs utilisés pour l'étude du dos.

II.3.3 Enregistrement des chevaux à l'obstacle.

Les manipulations ont été réalisées au CEZ de Rambouillet le 31 Juillet 2000. Avant leur séance, les chevaux ont été échauffés en longe aux trois allures. Ils étaient ensuite accoutumés au couloir d'obstacle et à la vue du dispositif d'enregistrement (caméras et projecteurs) en répétant quelques passages au trot en main puis au galop en liberté. L'échauffement se poursuivait par des passages en liberté sur des barres au sol et sur un petit croisillon.

Les obstacles étaient placés de façon à ce que le dispositif soit situé au centre de la zone d'enregistrement.

Le côté gauche des chevaux était filmé alors qu'ils sautaient en liberté. Les passages étaient répétés successivement jusqu'à l'obtention de 5 sauts sans faute pour chaque cheval.

Le pied de galop à l'abord et à la réception n'a été soumis à aucune exigence particulière pour ne pas alourdir le protocole. Il a été supposé qu'il existait peu d'incidence de ce paramètre sur les variables du dos étudiées.

II.4 METHODE D'ANALYSE DES DONNEES.

II.4.1 Variables étudiées.

Les données ont été étudiées dans un plan sagittal. L'ensemble des 5 marqueurs du dos a permis l'étude de 3 angles (Fig. 10) :

- l'angle thoracique,
- l'angle thoraco-lombaire,
- l'angle lombo-sacral.

Par convention avec des études précédentes (Audigié *et al.* 1999 ; Cassiat-Morrisset 2004), les angles sont calculés dorsalement à la ligne du dessus. Une flexion du dos se traduit par une augmentation de la valeur de l'angle calculé et une extension par une diminution de cette valeur.

Sur chaque passage des chevaux, les valeurs maximales et minimales de ces variables ont été relevées et les amplitudes entre les 2 valeurs extrêmes ont été calculées.



Figure 10 : Les 5 marqueurs dorsaux et matérialisation des angles thoracique, thoraco-lombaire et lombo-sacral.

II.4.2 Détermination des différentes phases du saut.

Aucune donnée n'étant accessible sur les membres du côté droit des chevaux, la délimitation complète des foulées par repérage des levers et des posers des membres est rendue difficile. Toutefois, s'agissant du saut de puce, la phase intermédiaire entre les obstacles est réduite et les levers ou posers des postérieurs sont symétriques permettant ainsi d'utiliser les marqueurs des membres non directeurs lors de passages au galop à droite afin de délimiter les phases du saut.

Afin de faciliter l'étude comparative menée dans notre étude, la réalisation du saut de puce a été envisagée comme l'accomplissement de deux sauts successifs nommés saut 1 et saut 2 avec leur enchaînement propre de l'appel à la réception (Tableaux 2, 3, 4 et 5).

II.4.3 Analyse des données.

Dans un premier temps, l'analyse des sauts a été effectuée : les valeurs maximales et minimales des angles dorsaux ont été objectivées et ont permis le calcul des amplitudes de flexion et d'extension de ces angles décrites sur la période allant de la fin de la foulée d'abord à sa réception pour le saut 1 et de l'appel au début de la foulée de reprise pour le saut 2.

Les moyennes, écart-types, variabilité intra-individuelle (IAV) et inter-individuelle (IEV) des amplitudes des variables du dos ont été calculés sur l'ensemble des chevaux et ces données ont été comparées à celles relevées lors du passage de ces mêmes chevaux sur un obstacle d'un mètre et un mètre cinquante à l'aide d'un test de Student pairé ($p < 0,05$).

III. ETUDE DES AMPLITUDES DE FLEXION ET D'EXTENSION DU DOS DU CHEVAL LORS D'UN SAUT DE PUCE.

III.1 DESCRIPTION QUALITATIVE DES MOUVEMENTS DE FLEXION/EXTENSION DU DOS.

Le tracé de référence des amplitudes de flexion et d'extension du dos du cheval lors de la réalisation du saut de puce est présenté dans la figure 11.

Etant donné la longueur du champ d'enregistrement utilisé et la nécessité de placer le dispositif expérimental au centre de ce champ, les données sur la dernière foulée d'abord du premier obstacle ne seront pas prises en compte puisque situées à la limite de ce dernier.

III.1.1 Appel du premier obstacle.

Les angles thoracique, thoraco-lombaire et lombo-sacrale s'étendent durant toute la phase d'appui des postérieurs à l'appel observant une valeur maximale de flexion (Max 1) à la fin de la phase de suspension de la dernière foulée d'abord, lorsque le cheval ramène ses postérieurs sous son corps, et une valeur maximale d'extension (Min 2) lorsque les postérieurs du cheval quittent le sol.

III.1.2 Saut du premier obstacle.

Une fois que le cheval a quitté le sol et durant la phase aérienne, les trois angles dorsaux maintiennent une attitude générale en extension mais réalisent successivement un mouvement de flexion/extension de faible amplitude lorsqu'ils passent respectivement au-dessus de la barre d'obstacle, soit selon une séquence crânio-caudale (Min 2-Max 3-Min 4). L'extension générale de la ligne du dos se poursuit jusqu'à la réception du premier obstacle pour atteindre un maximum d'extension commun (Min 4) lors de la reprise de contact des antérieurs avec le sol.

III.1.3 Réception du premier obstacle - Appel du second obstacle.

Au cours de la phase de suspension entre les deux obstacles, les trois jonctions dorsales se fléchissent. Le maximum de flexion de l'angle lombo-sacral (Max'1) est atteint au milieu de cette phase lorsque le cheval engage ses postérieurs et lorsque ces derniers touchent le sol pour les angles thoraco-lombaire et thoracique, soit selon une séquence caudo-crâniale.

Puis, les trois charnières thoraciques s'étendent durant la phase de flexion des postérieurs à l'appel du second obstacle. La charnière thoracique atteint une extension maximale (Min'2) lorsque les postérieurs sont en flexion maximale. Au cours de la phase de propulsion des postérieurs, la jonction thoracique se fléchit alors que l'extension des charnières thoraco-lombaire et lombo-sacrée se poursuit, leur extension maximale (Min'2) étant concomitante du maximum de flexion de l'angle thoracique (Max'3), après que le cheval ait quitté le sol.

III.1.4 Saut du second obstacle.

Au cours de la première partie du planer, la jonction thoracique effectue une extension alors que les jonctions thoraco-lombaire et lombo-sacrée fléchissent à leur tour. Ces deux charnières réalisent un léger mouvement de flexion-extension (Min'2-Max'3-Min'4) durant le planer comme lors du franchissement du premier obstacle. Le franchissement du dos au dessus de l'obstacle se traduit par une extension des trois jonctions. La fin du passage des postérieurs au-dessus de l'obstacle s'accompagne d'une flexion des trois angles.

III.1.5 Réception du second obstacle.

Lors de la réception du second obstacle, les trois charnières poursuivent leur flexion accompagnant le ramener des postérieurs sous le corps durant la réception pour atteindre un maximum de flexion (Max 5) à la fin de cette phase. Comme à la réception du premier obstacle, les flexions maximales sont atteintes selon une séquence caudo-crâniale.

III.1.6 Foulée de reprise.

Les angles dorsaux diminuent indiquant une extension générale du dos dans la première partie de la foulée de reprise.

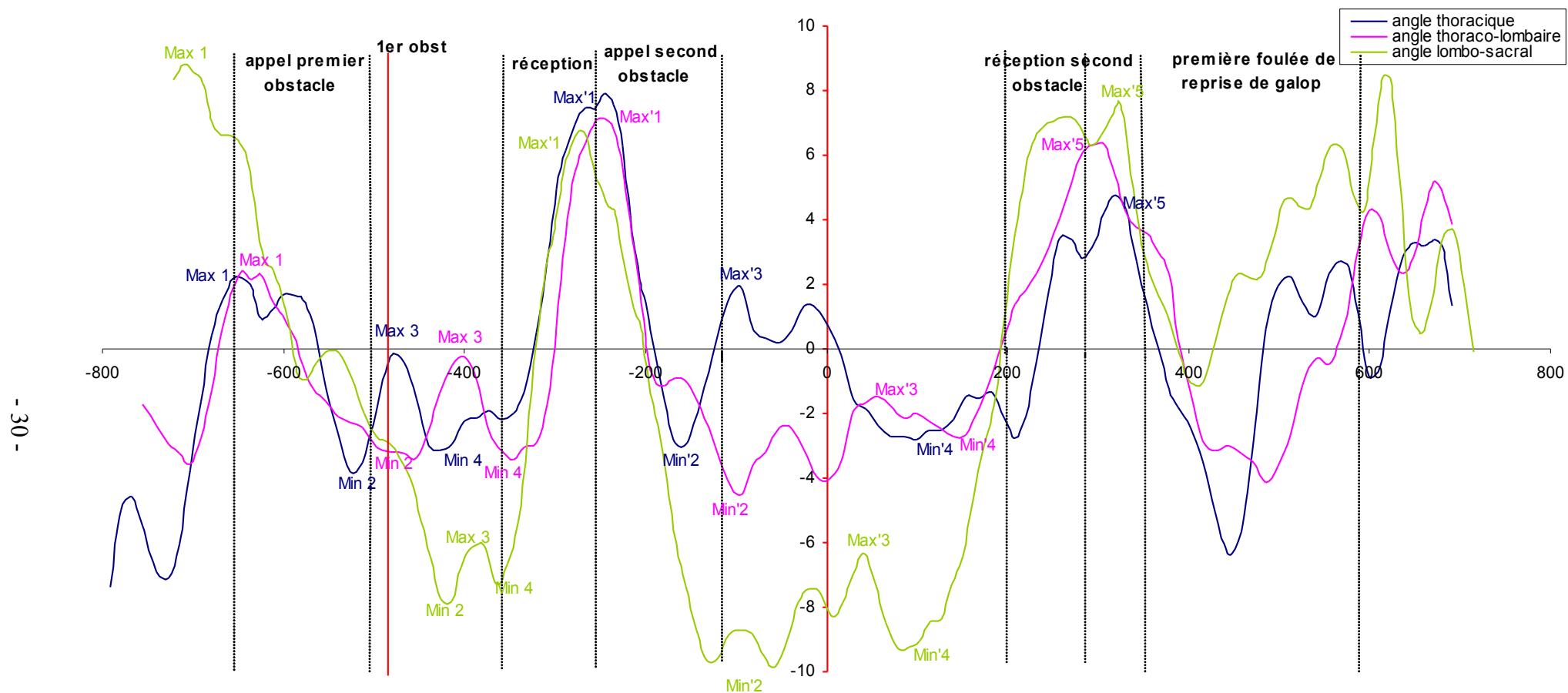


Figure 11 : Exemple de tracé des angles du dos obtenus lors du second saut de BY. Les angles sont représentés par la variation autour de leur valeur moyenne sur l'ensemble du passage. Ils sont exprimés en fonction de la position longitudinale du garrot par rapport à l'obstacle. La valeur nulle sur l'axe longitudinal représente l'emplacement du second obstacle. Les différentes phases du saut sont représentées par les pointillés verticaux.

III.2 DESCRIPTION QUANTITATIVE ET VARIABILITE DES MOUVEMENTS DE FLEXION-EXTENSION DU DOS.

Les valeurs des amplitudes de flexion et d'extension du dos du cheval ainsi que les variabilités intra et inter-individuelle (IAV et IEV) sont présentées dans les tableaux 2 et 3.

III.2.1 Description quantitative.

En ce qui concerne les amplitudes de flexion-extension, les variations angulaires les plus importantes des jonctions thoracique, thoraco-lombaire et lombo-sacrale sont, en moyenne, respectivement de 10,7°, 14,4° et 16,7°. Les amplitudes les plus faibles de variation de ces angles sont en moyenne respectivement de 3,5°, 1,5° et 1,8°.

Les plus fortes amplitudes d'extension sont observées en moyenne au cours de la flexion des postérieurs à l'appel de l'oxer (respectivement 10,4°, 14,4° et 16,7°), les plus fortes amplitudes de flexion se réalisant lors de la réception du premier obstacle pour les angles thoracique et thoraco-lombaire (respectivement 10,7° et 12,0°) et lors de la réception du second obstacle pour la jonction lombo-sacrale (15,9°).

La jonction lombo-sacrale observe les plus fortes amplitudes de flexion (15,9°) et d'extension (16,7°).

III.2.2 Variabilité.

Concernant les amplitudes de flexion-extension, les IEV restent faibles avec des valeurs extrêmes de 0,5 à 2,6. Les valeurs les plus faibles sont relevées pour les amplitudes d'extension Ampl 3 des angles thoraco-lombaire et lombo-sacral (0,5° et 0,7°) et Ampl'3 (0,5°). Les IAV sont comparables aux IEV (de 0,6° à 3,8°). L'amplitude de flexion Ampl 1 enregistre les plus fortes IAV pour les charnières thoracique et lombo-sacrale (2,0° et 3,8°), les valeurs les plus faibles se retrouvant pour l'amplitude d'extension Ampl'3 des jonctions thoraco-lombaire et lombo-sacrale (respectivement 0,6° et 0,7°).

Les rapports IEV/IAV sont homogènes et restent faibles (de 0,6 à 2,0). La valeur la plus élevée est enregistrée pour l'amplitude d'extension Ampl 3 de la charnière thoracique alors que les jonctions thoraco-lombaire et lombo-sacrale possèdent les plus faibles valeurs pour cette même amplitude (0,6 et 0,7).

III.3 COMPARAISON AVEC LE SAUT D'UN OBSTACLE SIMPLE.

Suivant les mêmes conditions d'enregistrement, les amplitudes de flexion-extension du dos du cheval ont été étudiées sur le saut d'un obstacle vertical simple d'un mètre et d'un mètre cinquante (Cassiat-Morrisset 2004). Une étude statistique a été entreprise afin de comparer les valeurs extrêmes de ces amplitudes (Tableau 4 et 5).

Il convient de souligner que l'amplitude d'extension Ampl 1 ne sera pas considérée, certains points étant situés à la limite du dispositif d'enregistrement.

III.3.1 Saut d'un vertical d'un mètre.

A l'appel du premier obstacle et durant le saut, aucune différence significative n'est observée du point de vue des amplitudes de flexion-extension des trois angles.

L'amplitude de flexion Ampl 4 des angles thoracique et thoraco-lombaire est significativement plus importante au cours de la phase de réception/appel d'un saut de puce que lors de la réception d'un obstacle simple, alors que la jonction lombo-sacrale n'observe pas de différence.

La charnière thoracique connaît une plus grande amplitude d'extension et de flexion (Ampl'1, Ampl' 2) durant la phase d'appel du second obstacle, l'extension des deux autres angles au cours de la même période étant significativement plus importante (Ampl'1).

La flexion réalisée par les angles thoraco-lombaire et lombo-sacral (Ampl'2) est plus importante lors du planer du second obstacle d'un saut de puce que de celui d'un vertical d'un mètre.

Aucune différence significative n'est observée dans les amplitudes de flexion et d'extension du dos lors de la réception et de la foulée de galop de reprise (Ampl'3, Ampl'4) mis à part l'amplitude de flexion Ampl'4 de l'angle thoracique.

III.3.2 Saut d'un vertical d'un mètre cinquante.

Aucune différence significative n'est observable sur les amplitudes de la phase intermédiaire entre les deux obstacles, exceptée l'amplitude d'extension Ampl'2 de la jonction lombo-sacrée plus importante au cours du planer du second obstacle à un mètre d'une combinaison en saut de puce que lors du saut d'un vertical simple à un mètre cinquante.

En revanche, les amplitudes de flexion Ampl 2 et d'extension Ampl 3 et Ampl'3 relevées sur l'angle thoracique sont significativement plus importantes lors du franchissement d'un obstacle simple d'1,5 mètre que lors du franchissement de la combinaison en saut de puce.

De même, l'amplitude de flexion Ampl'4 de l'angle thoraco-lombaire est significativement plus importante lors de la réception de l'obstacle simple d'1,5 mètre que lors de la réception du second obstacle à 1 mètre de hauteur d'une combinaison en saut de puce.

Enfin, l'amplitude de flexion Ampl'2 relevée sur l'angle lombo-sacral lors de la phase de planer du second obstacle de la combinaison en saut de puce est significativement plus importante que lors du planer au-dessus de l'obstacle simple considéré.

SAUT 1

	Ampl 1	Ampl 2	Ampl 3	Ampl 4
	(Max 1 - Min 2)	(Max 3 - Min 2)	(Max 3 - Min 4)	(Max'1 - Min 4)
moyenne				
angle thoracique				
BY	7,1	2,3	7,6	15,0
CH	3,9	2,2	5,1	10,1
FU	5,7	3,0	2,3	8,8
AS	6,1	5,6	7,2	9,9
EF	4,2	3,8	8,1	9,7
angle thoraco-lombaire				
BY	10,1	2,8	2,2	14,9
CH	5,7	1,8	1,1	9,7
FU	6,5	2,7	2,0	10,5
AS	10,7	4,0	2,2	12,8
EF	7,9	3,5	1,3	12,4
angle lombo-sacral				
BY	12,5	1,9	2,9	15,7
CH	16,0	2,7	1,5	13,0
FU	15,9	1,8	1,0	11,5
AS	17,6	3,0	1,6	10,8
EF			1,2	14,3
	Ampl 1	Ampl 2	Ampl 3	Ampl 4
	(Max 1 - Min 2)	(Max 3 - Min 2)	(Max 3 - Min 4)	(Max'1 - Min 4)
Moyenne globale				
angle thoracique	5,5	3,5	6,2	10,7
angle thoraco-lombaire	8,2	3,0	1,8	12,0
angle lombo-sacral	15,1	2,6	1,7	13,1
IEV				
angle thoracique	1,3	1,4	2,4	2,5
angle thoraco-lombaire	2,2	0,8	0,5	2,0
angle lombo-sacral	2,4	1,5	0,7	2,0
IAV				
angle thoracique	2,0	0,8	1,2	1,9
angle thoraco-lombaire	1,2	1,0	0,9	1,5
angle lombo-sacral	3,8	1,1	1,0	1,3
IEV/IAV				
angle thoracique	0,7	1,7	2,0	1,3
angle thoraco-lombaire	1,9	0,8	0,6	1,3
angle lombo-sacral	0,6	1,3	0,7	1,5

Tableau 2 : Moyennes par cheval et sur les 5 chevaux et variabilité des amplitudes de flexion-extension du dos lors du passage du premier obstacle de la combinaison en saut de puce.

SAUT 2

	Ampl'1	Ampl'2	Ampl'3	Ampl'4
	(Max'1 - Min'2)	(Max'3 - Min'2)	(Max'3 - Min'4)	(Max'5 - Min'4)
moyenne				
angle thoracique				
BY	12,8	4,4	5,6	5,9
CH	11,8	4,4	7,0	8,8
FU	9,5	4,6	4,8	7,9
AS	9,6	6,6	6,0	7,9
EF	8,3	4,6	8,0	6,2
angle thoraco-lombaire				
BY	17,0	5,4	2,0	6,1
CH	11,8	4,7	1,8	5,4
FU	11,5	3,2	1,6	8,9
AS	16,0	7,4	0,7	6,1
EF	15,6	3,0	1,5	8,4
angle lombo-sacral				
BY	16,9	2,5	2,6	15,8
CH	17,2	4,1	1,4	17,2
FU	15,2	4,3	1,4	14,9
AS	15,9	4,5	1,6	15,0
EF	18,2	3,8	1,7	16,8
	Ampl'1	Ampl'2	Ampl'3	Ampl'4
	(Max'1 - Min'2)	(Max'3 - Min'2)	(Max'3 - Min'4)	(Max'5 - Min'4)
Moyenne globale				
angle thoracique	10,4	4,9	6,3	7,3
angle thoraco-lombaire	14,4	4,7	1,5	6,9
angle lombo-sacral	16,7	3,8	1,8	15,9
IEV				
angle thoracique	1,9	0,9	1,2	1,2
angle thoraco-lombaire	2,6	1,8	0,5	1,5
angle lombo-sacral	1,2	0,8	0,5	1,0
IAV				
angle thoracique	1,8	1,0	1,2	0,9
angle thoraco-lombaire	1,6	1,4	0,6	1,5
angle lombo-sacral	1,0	0,9	0,7	1,0
IEV/IAV				
angle thoracique	1,0	1,0	1,0	1,4
angle thoraco-lombaire	1,6	1,2	0,8	1,0
angle lombo-sacral	1,1	0,9	0,8	1,1

Tableau 3 : Moyennes par cheval et sur les 5 chevaux et variabilité des amplitudes de flexion-extension du dos lors du passage du second obstacle de la combinaison en saut de puce.

	angle thoracique (°)		angle thoraco-lombaire (°)		angle lombo-sacral (°)	
saut 1	saut de puce	vertical 1 m	saut de puce	vertical 1 m	saut de puce	vertical 1 m
Ampl 1	5,5 ± 2,5	6,3 ± 1,3	8,2 ± 2,3	9,5 ± 4,3	15,1 ± 4,2	12,2 ± 2,1
Ampl 2	3,5 ± 1,6	3,2 ± 1,6	3,0 ± 1,2	2,3 ± 0,8	2,6 ± 1,3	2,3 ± 0,5
Ampl 3	6,2 ± 2,5	7,1 ± 3,1	1,8 ± 1,0	2,8 ± 3,5	1,7 ± 1,3	1,1 ± 0,4
Ampl 4	10,7 ± 2,9	4,8 ± 2,6	12,0 ± 2,4	6,4 ± 2,2	13,1 ± 2,2	14,1 ± 2,0
saut 2	saut de puce	vertical 1 m	saut de puce	vertical 1 m	saut de puce	vertical 1 m
Ampl'1	10,4 ± 2,5	6,3 ± 1,3	14,4 ± 2,8	9,5 ± 4,3	16,7 ± 1,5	12,2 ± 2,1
Ampl'2	4,9 ± 1,3	3,2 ± 1,6	4,7 ± 2,3	2,3 ± 0,8	3,8 ± 1,1	2,3 ± 0,5
Ampl'3	6,3 ± 1,6	7,1 ± 3,1	1,5 ± 0,7	2,8 ± 3,5	1,8 ± 0,8	1,1 ± 0,4
Ampl'4	7,3 ± 1,4	4,8 ± 2,6	6,9 ± 2,1	6,4 ± 2,2	15,9 ± 1,3	14,1 ± 2,0

Tableau 4 : Comparaison des moyennes des amplitudes de flexion-extension du dos des 5 chevaux entre un vertical simple à 1m et une combinaison en saut de puce à 1m. Les données en gras représentent une différence significative ($p < 0,05$).

	angle thoracique (°)		angle thoraco-lombaire (°)		angle lombo-sacral (°)	
saut 1	saut de puce	vertical 1,5 m	saut de puce	vertical 1,5 m	saut de puce	vertical 1,5 m
Ampl 1	5,5 ± 2,5	9,6 ± 2,5	8,2 ± 2,3	12,3 ± 2,7	15,1 ± 4,2	14,8 ± 2,5
Ampl 2	3,5 ± 1,6	6,6 ± 2,9	3,0 ± 1,2	3,7 ± 1,0	2,6 ± 1,3	2,1 ± 1,0
Ampl 3	6,2 ± 2,5	10,2 ± 2,1	1,8 ± 1,0	2,9 ± 1,5	1,7 ± 1,3	1,7 ± 0,8
Ampl 4	10,7 ± 2,9	8,3 ± 3,1	12,0 ± 2,4	9,75 ± 1,2	13,1 ± 2,2	14,3 ± 3,9
saut 2	saut de puce	vertical 1,5 m	saut de puce	vertical 1,5 m	saut de puce	vertical 1,5 m
Ampl'1	10,4 ± 2,5	9,6 ± 2,5	14,4 ± 2,8	12,3 ± 2,7	16,7 ± 1,5	14,8 ± 2,5
Ampl'2	4,9 ± 1,3	6,6 ± 2,9	4,7 ± 2,3	3,7 ± 1,0	3,8 ± 1,1	2,1 ± 1,0
Ampl'3	6,3 ± 1,6	10,2 ± 2,1	1,5 ± 0,7	2,9 ± 1,5	1,8 ± 0,8	1,7 ± 0,8
Ampl'4	7,3 ± 1,4	8,3 ± 3,1	6,9 ± 2,1	9,75 ± 1,2	15,9 ± 1,3	14,3 ± 3,9

Tableau 5 : Comparaison des moyennes des amplitudes de flexion-extension du dos des 5 chevaux entre un vertical simple à 1,5m et une combinaison en saut de puce à 1 m. Les données en gras représentent une différence significative (p<0,05).

IV. DISCUSSION.

IV.1 EVALUATION DES ERREURS LIEES A LA METHODE.

De toutes les méthodes utilisées pour étudier le mouvement en biomécanique équine, l'analyse cinématique semble être la plus adaptée à l'étude des mouvements articulaires (Schamhardt *et al.* 1993). Dans la cas de notre étude *in vivo*, elle ne reflète pas le mouvement réel des articulations mais la position les uns par rapport aux autres de marqueurs cutanés placés en des points spécifiques du corps du cheval tels ceux choisis pour la ligne du dos. Afin d'enregistrer ces mouvements lorsque qu'un cheval franchit une combinaison double en saut de puce, un champ d'au moins 10 mètres est nécessaire afin de ne pas perdre les données concernant l'abord du premier obstacle et la réception du second. Alors qu'une analyse 2D serait entachée par des erreurs de mesure importantes liées à la parallaxe et aux déformations des images par les systèmes optiques classiques, la minimisation de ces erreurs nécessite de prendre un recul important, mais l'utilisation de champs larges implique préférentiellement le recours à la reconstruction 3D (Degueurce 1995 ; Cassiat-Morrisset 2004).

Vu la longueur de champ utilisé, les systèmes cinématiques 3D à caméras fixes s'avèrent limités pour une telle distance du fait de la perte de précision dans les mesures liée au recul des caméras. L'utilisation de caméras rotatives permet de palier ce défaut : elle augmente la place occupée par le sujet sur l'image tout en filmant des champs d'étude plus important.

IV.1.1 Le volume d'étude calibré.

L'inconvénient majeur d'une grande structure de calibration réside dans sa manipulation. L'assemblage des cadres métalliques qui constituent la base de la structure expose au risque d'avoir un mauvais alignement entre les unités. Un système de vissage permettant une forte cohésion entre les cadres et le contrôle de l'horizontalité de l'assemblage par des niveaux à bulle ont permis d'éviter les erreurs éventuelles.

Au-delà des limites de la zone de calibrage, le calcul des coordonnées des points perd de sa précision. L'extrapolation de la D.L.T. à l'extérieur du volume de calibrage entraîne une augmentation significative de l'erreur de calcul (Wood et Marshall 1986). Dans notre étude, la foulée d'abord du premier obstacle n'est pas incluse dans le volume de calibration, l'appel se situant en bordure de la zone définie. Il conviendra de rester prudent quand à l'interprétation de ces résultats.

IV.1.2 Précision et résolution.

La comparaison des différentes méthodes d'enregistrement montre que le système utilisant des caméras rotatives améliore nettement la précision (rapport de 1 sur 2 en X et de 1 sur 1,5 pour les axes Y et Z) mais très peu la résolution (excepté pour l'axe Y) par rapport à un système de caméras fixes utilisé sur un même champ d'étude (Cassiat-Morrisset 2004) (Tableau 6).

	X (axe longitudinal)	Y (axe transversal)	Z (axe vertical)
PRECISION (mm)			
2 caméras fixes	17,3	24,8	12
2 caméras rotatives	8,1	14,9	8,3
RESOLUTION (mm)			
2 caméras fixes	6,4	19,4	6
2 caméras rotatives	5,3	15,3	5,1

Tableau 6 : Précision et résolution des méthodes d'enregistrement à caméras fixes et rotatives sur un champ calibré de 10m.

IV.1.3 Fréquence d'acquisition

La fréquence d'acquisition des images peut-être une limite à l'analyse cinématique du déplacement du cheval. Elle doit être élevée afin d'obtenir une bonne décomposition d'un

mouvement tel que le saut. Linford (1994) ne trouve pas de différence significative entre des enregistrements à 60 Hz (norme américaine) et des enregistrements à 1000 HZ sur les données cinématiques de chevaux trotant sur un tapis roulant à la vitesse de 3m/s. Vu la vitesse de déplacement modérée du dos du cheval au cours du saut de 5m/s (Barrey 1993, Cassiat-Morrisset 2004), la fréquence d'acquisition des trames de 50 Hz des caméras utilisées en europe est acceptable. Ainsi, le nombre d'images obtenues est important et le traitement des informations qu'elles fournissent nécessite son informatisation (Thoulon 1991).

IV.1.4 Erreurs liées au traitement informatique.

L'adhésif disposé sur les marqueurs possède un pouvoir réfléchissant 1000 fois supérieur à celui d'une feuille de papier blanc. Il permet la réflexion de la lumière selon la direction du rayon incident. Le tracking s'effectue selon la luminosité du marqueur ; ainsi, il arrive que certains marqueurs soient masqués par un défaut de luminosité, il n'apparaît donc pas à la reconstruction. Ceci est corrigé grâce à une fonction semi-automatique : le manipulateur peut à chaque instant contrôler les étapes du relevé des points, image par image, et entreprendre les rectifications éventuelles. D'autre part, le logiciel relève la position des marqueurs par le calcul de leur barycentre (dépendant directement de la taille de ce dernier, c'est-à-dire suivant sa luminosité) sur chacune des trames. Ainsi, on note l'apparition d'un phénomène de bruit sur les courbes qui peut-être corrigé par l'ajout d'un filtre.

IV.1.5 Les marqueurs cutanés.

Par le choix d'un protocole expérimental non invasif, l'utilisation de marqueurs cutanés collés à la peau pose deux problèmes majeurs : la localisation précise des reliefs osseux, les marqueurs devant représenter les centres instantanés de rotation (CIR) des articulations qui varie en fonction du mouvement de l'articulation (Leach et Dyson 1988) ainsi que les erreurs dues aux déplacements cutanés sur ces reliefs (Clayton 1991).

Afin de limiter les erreurs de placement du marqueur, des repères anatomiques précis et palpables ont été utilisés et le positionnement des marqueurs sur les chevaux a été réalisé par le même opérateur.

Le calcul objectif des erreurs liées aux mouvements cutanés n'est décrit que pour les membres antérieurs et postérieurs du cheval au pas et au trot (Van Weeren 1990a, 1990b). Etant donné les adhérences existantes entre les processus épineux des vertèbres de la colonne dorsale, le ligament supra-épineux et la peau, les mouvements cutanés de la ligne dorsale seront considérés comme faibles.

La validité de l'utilisation de marqueurs cutanés disposés sur le dos du cheval est décrite par Faber *et al.* (2001) dans une étude comparative avec des implants osseux sur des chevaux au pas et au trot. Il ressort de cette étude qu'il existe une corrélation supérieure à 90% entre les deux méthodes concernant les mouvements de flexion-extension. Ainsi, les marqueurs cutanés permettent d'obtenir une bonne représentation des mouvements de la ligne du dos du cheval sans que les valeurs calculées ne représentent les variations réelles des mouvements de la colonne.

IV.2 EVALUATION ET JUSTIFICATION DES CONDITIONS DE SAUT.

IV.2.1 Le saut en liberté.

Barrey et al (2002) ont montré que dans le but d'améliorer la sélection des reproducteurs de CSO, les héritabilités les plus élevées concernaient l'aptitude au saut en liberté des qualités de l'abord au galop aux caractéristiques de la réception. Il paraît donc intéressant de développer des techniques permettant une meilleure évaluation des qualités de saut du cheval.

Devant la nécessité de créer des conditions comparables entre les chevaux, le choix du saut en liberté s'est imposé, une action du cavalier étant non négligeable en fonction des qualités et des aptitudes du cheval à l'obstacle (Galloux et Barrey 1995 ; Powers et Harrison 2000).

D'autre part, la présence d'un cavalier n'aurait pas permis l'étude complète de la ligne du dos, empêchant le positionnement de certains marqueurs.

IV.2.2 La ligne d'obstacle.

Le choix de la hauteur de l'obstacle découle de notre étude comparative. La hauteur d'un mètre fut retenue après consultation des professionnels du saut d'obstacle (Cassiat-Morrisset 2004) ; la comparaison avec le saut d'un vertical simple d'1,50 m découle d'une étude statistique menée sur l'influence de la hauteur d'un obstacle vertical sur les amplitudes de flexion-extension de la ligne du dos (Cassiat-Morrisset thèse de science).

IV.2.3 Validité des sauts.

Seuls les sauts après 5 passages consécutifs sans faute ont été pris en compte. Aucune exigence n'a été requise sur le pied de galop à l'abord et à la réception, ce paramètre possédant peu d'influence sur les variables du dos étudiées.

En outre, la présence de deux obstacles en combinaison entraîne une standardisation des conditions de saut, tous les chevaux prenant un appel symétrique des postérieurs au second obstacle.

IV.2.4 Représentativité des échantillons.

L'échantillon des cinq chevaux n'est pas représentatif de la population des chevaux en France. Toutefois le but de notre étude n'est pas de fournir des données chiffrées précises mais plutôt de décrire le mouvement du dos du cheval lors de la réalisation d'un saut de puce. Les contraintes financières, temporelles et techniques ne permettent pas de réaliser ces mesures sur un plus grand nombre d'individu.

Afin d'évaluer la répétabilité des mouvements du dos durant le saut de puce, les variations intra individuelle et inter individuelle ont été calculées et comparées en objectivant le ratio IEV/IAV (Degueurce *et al.* 1997). Exceptées quelques valeurs comprises entre 0,6 et 0,9, l'ensemble des ratios varie de 1 à 2 montrant que dans les conditions du saut de puce la mobilité du dos diffère plus entre les chevaux qu'entre les différents sauts d'un même cheval, phénomène déjà observé pour les flexions-extensions du dos du cheval durant le trot (Audigié *et al.* 1999) ainsi que lors du franchissement d'un obstacle simple (Cassiat-Morrisset 2004).

IV.3 LES MOUVEMENTS DU DOS LORS DU SAUT DE PUCE.

IV.3.1 Le saut en général.

Si l'on se réfère à la description qualitative des courbes obtenues, on ne constate pas de réelle différence entre l'exécution des deux sauts de la combinaison d'obstacle. Les grands mouvements d'extension et de flexion de la colonne dorsale sont réalisés aux mêmes instants. Ces courbes sont également similaires à celles obtenues par Cassiat-Morrisset (2004) lors de son étude du franchissement d'un obstacle simple.

Au niveau quantitatif, les plus fortes amplitudes d'extension sont retrouvées durant la phase d'appel et les plus fortes amplitudes de flexion sont retrouvées durant la réception si l'on considère les sauts séparément, phénomène également relevé par Cassiat-Morrisset (2004). Les mouvements angulaires observés sur la jonction lombo-sacrale lors du franchissement du premier obstacle rejoignent également ceux décrits par Thoulon (1991) dans une étude sur des chevaux montés à l'obstacle.

Durant le saut du second obstacle, les attitudes d'extension générale sont plus marquées et plus longues que lors du franchissement du premier obstacle. Ce phénomène peut-être expliqué par le fait que le cheval franchit un oxer, obstacle qui augmente la longueur du saut par rapport à un vertical simple (Thoulon 1991). D'autre part, lors du saut du premier obstacle, la vue du second doit inciter le cheval à ne pas s'étendre totalement afin de ne pas se réceptionner trop près de ce dernier, l'appui des postérieurs se faisant en moyenne à une distance de 1,5 fois la hauteur de l'obstacle pour des chevaux expérimentés (Barrey *et al.* 1993).

IV.3.2 Particularités de la phase intermédiaire du saut de puce.

Le saut de puce trouve son originalité lors de sa phase intermédiaire. Le travail essentiel du cheval consiste à inverser le sens du déplacement vertical (descendant puis ascendant) de son corps. L'encolure et les antérieurs jouent un rôle déterminant car ce sont eux qui placent l'avant-main dans une position favorable au franchissement du second obstacle (Denoix 1988).

Lors de la réception d'un obstacle simple, au contraire, le cheval doit inverser la rotation de son tronc et rediriger son mouvement général de descente en un mouvement vers l'avant. A la réception, les membres antérieurs ainsi que les membres postérieurs exercent une importante impulsion de propulsion longitudinale indiquant qu'une forte poussée vers l'avant est nécessaire pour permettre au cheval de repartir sur une foulée de galop normale (Schamhardt *et al.* 1993). Lors de la réception du premier obstacle d'un saut de puce, la descente de l'encolure est limitée afin de ne pas surcharger l'avant-main dans les phases suivantes. Le travail d'amortissement par les antérieurs est donc accru (Denoix 1988). Selon la même étude, au cours de ce mouvement, la courbure cervico-thoracique reste dans une position d'extension justifiée par la recherche d'un allègement maximum de l'avant-main entraînant un rapprochement des processus épineux du garrot qui peut-être générateur de douleur. Notre étude montre que lors de cette phase intermédiaire, les variations d'amplitude d'extension de la colonne thoracique peuvent s'avérer être de 4° supérieures à celles obtenues lors de la réception d'un obstacle simple de même hauteur. En accord avec Denoix (1988), il convient de contre-indiquer le saut de puce chez les chevaux sensibles à l'extension de la charnière thoracique.

Concernant les autres charnières dorsales, l'amortissement à la réception du premier obstacle nécessite un engagement marqué des postérieurs ainsi que d'importantes amplitudes de flexion des charnières thoraco-lombaire et lombo-sacrale. Il est cependant intéressant de remarquer que l'angle lombo-sacral n'observe pas de flexion significativement plus importante lors de la réception du premier obstacle d'un saut de puce alors que les amplitudes d'extension et flexion restent plus importantes pour les trois charnières sur la période allant de la réception du premier obstacle jusqu'à la phase de planer du saut du second obstacle. Ainsi, le saut de puce est un exercice à limiter sur des chevaux souffrant d'affections dorsales de manière générale.

Cependant, ne considérant que la phase intermédiaire, ces différences d'amplitudes dorsales ne sont plus observées si l'on compare nos données au franchissement d'un obstacle simple d'1,5 m. S'agissant des autres données du saut, le vertical est générateur d'amplitudes de flexion et d'extension plus importantes que le saut de puce de deux obstacles de 90 cm et 1 m de hauteur. Schamhardt *et al.* (1993) montre par l'étude des forces de réaction au sol du membre antérieur à la réception que ces dernières sont accrues lorsque la hauteur de l'obstacle augmente. A contraintes dorsales égales, le saut de puce pourrait donc être une alternative pour l'entraînement de chevaux souffrant de pathologies tendineuses ou ligamentaires sur les membres antérieurs tout en gardant à l'esprit que la finalité du saut d'obstacle reste le franchissement d'obstacles de hauteur importante. Toutefois, le saut de puce contribue à préparer efficacement l'avant-main du cheval à l'exécution de l'abord et de la réception du saut tout en infligeant des contraintes modérées aux membres du cheval (Denoix 1988).

CONCLUSION.

La description du passage d'une combinaison d'obstacle de type saut de puce n'avait été envisagée jusqu'à présent que de manière qualitative (Denoix 1988). Cette étude trouve son originalité dans l'élaboration d'une série de données quantitatives et objectives concernant les amplitudes de flexion et d'extension du dos du cheval, région fortement sollicitée chez les chevaux compétiteurs et à l'origine de pathologie.

Ainsi, elle permet d'envisager les limites à donner à cet exercice dans l'entraînement des chevaux d'obstacle et de concours complet tout en soulignant ses bénéfices sur les possibilités d'économie de l'appareil locomoteur par rapport à un travail sur des obstacles simples permettant donc le prolongement de la carrière sportive de cet athlète.

D'autre part, cette étude a permis de vérifier l'intérêt et la validité de la méthode d'analyse cinématique tridimensionnelle à caméras rotatives développée par l'UMR de biomécanique et validée par les travaux de Cassiat-Morrisset (thèse de doctorat d'université, thèse de doctorat vétérinaire 2004). Pour pouvoir étudier une combinaison d'obstacles, de grands champs d'investigation sont nécessaires. Cette technique a permis d'étudier la locomotion du cheval sur toute la longueur de la combinaison, de l'appel du premier obstacle à la foulée de reprise du second tout en fournissant des données comparables au franchissement d'un obstacle simple (Cassiat-Morrisset 2004). Malgré quelques difficultés d'utilisation en routine, cette méthode offre une alternative intéressante pour l'étude de la locomotion du cheval d'obstacle.

Toutefois, il ne s'agit là que d'une base de réflexion qui mériterait d'être complétée. Il serait en effet intéressant de pouvoir objectiver les mouvements ainsi que les forces appliquées aux membres lors de la phase intermédiaire de la combinaison afin de comprendre les contraintes réelles imposées par cet exercice sur les appareils ostéo-articulaires et tendineux. D'autre part, chez certains chevaux, le temps de suspension lors de la phase intermédiaire peut-être absent, le poser des postérieurs se faisant avant que les antérieurs ne quittent le sol (Denoix 1988). L'étude objective des vitesses de passage dans la combinaison et du temps de suspension permettrait d'appréhender la réactivité et la souplesse des chevaux.

L'analyse de l'ensemble de ces paramètres en compléments de ceux énumérés par Cassiat-Morrisset (2004) pourrait avoir comme finalité de définir des critères de sélection des chevaux de compétition tout en gardant à l'esprit que la prédiction du potentiel d'un cheval ne peut s'appuyer uniquement sur la biomécanique, la conformation, l'hérédité, l'entraînement et l'aptitude comportementale restent des facteurs hautement discriminants.

Bibliographie

Abdel-Aziz Y. I., Karara H. M. (1971) Direct linear transformation from comparator coordinates in close-range photogrammetry. *In: Proceedings of the American Society of Photograms*, Urbana, Illinois. 1-18.

Audigié F., Pourcelot P.; Degueurce C., Denoix J.M., Geiger D. (1999) Kinematics of the equine back: flexion-extension movements in sound trotting horses. *Equine Vet. J. Suppl.*, **30**, 210-213.

Barrey E., Blanchard G., Orange F. (1993) Analyse cinématique du saut chez le cheval de concours hippique. *Rec. Med. Vet.*, **169** (1), 37-43.

Barrey E., Hermelin M., Vaudelin J-L., Poirel D., Valette J.P. (1994) Utilisation of an accelerometric device in equine gait analysis. *Equine Vet. J. Suppl.*, **17**, 7-12.

Barrey E., Galloux P. (1995) Caractéristiques des foulées de l'abord, de l'appel et du saut. *EquAthlon*, **7** (26), 16-25.

Barrey E., Galloux P. (1997) Analysis of the equine jumping technique by accelerometry. *Equine Vet. J. Suppl.*, **23**, 45-49.

Barrey E., Desliens F., Blouin C., Langlois B. (2002) Mesures du modèle, des allures et du saut des étalons nationaux par la méthode Equimétrie. *In : Compte rendu de la 28^e Journée de la recherche équine*, Paris, France, 27 Février 2002, 157-176.

Cassiat-Morrisset-Morrisset G. (2004) Etude cinématique des mouvements du dos du cheval de saut d'obstacle. Thèse de Méd. Vét., Alfort, n°100, 105p.

Cassiat-Morrisset G. (2005) Thèse de doctorat d'université, Université Paris XII, à paraître.

Clayton H. M. (1989) Terminology for the description of equine jumping kinematics. *J. Equine Vet. Sci.*, **9** (4), 341-348.

- Clayton H. M. (1991) Advances in motion analysis. *Vet. Clin. North Am. Equine Pract.*, **7** (2), 365-382.
- Clayton H. M., Barlow D. A. (1991) Stride characteristics of four grand prix jumping horses. *In: Equine Exercise Physiology 3*, Eds : S.G.B. Persson, A. Lindholm and L.B. Jeffcott, ICEEP Publications, Davis, California, 151-157.
- Degueurce C. (1995) Analyse cinématique du trot du cheval sur terrain ferme. Thèse de science, Paris-Sud, 230p.
- Degueurce C., Pourcelot P., Audigié 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.
- Denoix J.-M. (1988) Biomécanique et travail physique du cheval. *L'éperon-Information Hippique*, Hors série, Levallois, France. 74p.
- Denoix J.-M. (1989) Etudes biomécaniques chez le cheval athlète : méthodes et objectifs actuels. *Rec. Méd. Vét.*, **165** (2), 107-115.
- Denoix J.-M. (1999) Spinal biomechanics and functional anatomy. *Vet. Clin. North Am. Equine Pract.*, **15** (1), 27-59.
- Domont M. (2004) Analyse cinématique du membre pelvien du cheval au cours du saut d'obstacle de 1 mètre. Thèse de Méd. Vét., Alfort, n°41, 117p.
- Faber M., Schamhardt H., van Weeren R., Barneveld A. (2001) Methodology and validity of assessing kinematics of the thoracolumbar vertebral column in horses on the basis of skin-fixated markers. *Am. J. Vet. Res.*, **62** (3), 301-306.
- Galloux P., Barrey E. (1995) Influence du cavalier sur le geste du cheval à l'obstacle à partir d'une étude cinématique. *Equathlon*, **7** (27), 4-7.
- Jeffcott L. B., Dalin G. (1980) Natural rigidity of the horse's backbone. *Equine Vet. J.*, **12** (3), 101-108.
- Jeffcott L.B. (1980) Disorders of the thoracolumbar spine of the horse-a survey of 443 cases. *Equine Vet. J.*, **12** (4), 197-210.

- Leach D. H., Ormrod K. (1984) The technique of jumping a steeplechase fence by competing event-horses. *Appl. Anim. Behav. Sci.*, **12**, 15-24.
- Leach D. H., Dyson S. (1988) Instant centres of rotation of equine limb joints and their relationship to standard skin markers location. *Equine Vet. J. Suppl.*, **6**, 113-119.
- Linford R. L. (1994) Camera speeds for optoelectronic assessment of stride-timing characteristics in horses at trot. *Am. J. Vet. Res.*, **55** (9), 1189-1195.
- Meershoek L. S., Schamhardt H. C., Roepstorff L., Johnston C. (2001) Forelimb tendon loading during jump landings and the influence of fence height. *Equine Vet. J. Suppl.*, **33**, 6-10.
- Peham C., Frey A., Licka T., Scheidl M. (2001) Evaluation of the EMG activity of the long back muscle during induced back movements at stance. *Equine Vet. J. Suppl.*, **33**, 165-168.
- Pourcelot P., Degueurce C., Audigié F., Denoix J.-M., Geiger D. (1997) Kinematics analysis of the locomotion symmetry of sound horses at slow trot. *Equine Vet. J. Suppl.*, **23**, 93-96.
- Pourcelot P., Cassiat G., Degueurce C., Denoix J.-M. (2001) 3-D reconstruction of markers trajectory using panning cameras and the DLT method. In: Arch. of Physiology and Biochemistry, 26e congrès de la Société de Biomécanique, Marseille, France, 13-14 Septembre 2001, 125.
- Powers P. N.R., Harrison A. J. (1999) Models for biomechanical analysis of jumping horses. *J. Eq. Vet. Sci.*, **19** (12), 799-806.
- Powers P. N. R., Harrison A. J. (2000) Rider effects on the take off kinematics in jumping horses. In: *Proceedings of the Fourth International Workshop on Animal Locomotion*. Vienna, Austria, 24-26 May 2000, 62.
- Robert C., Audigié F., Valette J. P., Pourcelot P., Denoix J.-M. (2001) Effects of treadmill speed on the mechanics of the back in the trotting saddlehorse. *Equine Vet. J. Suppl.*, **33**, 154-159.
- Ryckelynck A. (2003) Etude des mouvements des articulations des membres thoraciques du cheval de saut d'obstacle. Thèse de Méd. Vét., Alfort, n°20, 61p.
- Schamhardt H. C., Merckens H. W., Vogel V., Willekens C. (1993) External loads on the limbs of jumping horses at take-off and landing. *Am. J. Vet. Res.*, **54** (5), 675-680.

Thoulon F. (1991) Le saut du cheval : étude cinématographique informatisée. Thèse de Méd. Vét, Lyon, n°91, 115p.

Van Weeren P.R., van der Bogert A. J., Barneveld A. (1990a) A quantitative analysis of skin displacement in the trotting horse. *Equine Vet. J. Suppl.*, **9**, 101-109.

Van Weeren P.R., van der Bogert A. J., Barneveld A (1990b) Quantification of skin displacement in the proximal parts of the limbs of the walking horse. *Equine Vet. J. Suppl.*, **9**, 110-118.

Wood G. A., Marshall R. N. (1986) The accuracy of DLT extrapolation in three-dimensional film analysis. *J. Biomech.*, **19** (9), 781-785.