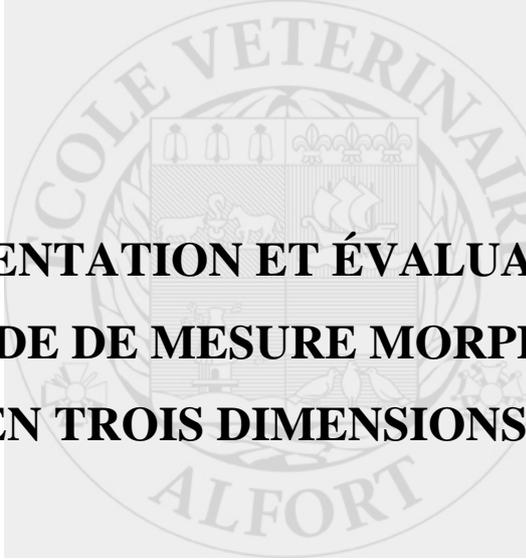


Année 2007



**PRÉSENTATION ET ÉVALUATION
D'UNE MÉTHODE DE MESURE MORPHOMÉTRIQUE
EN TROIS DIMENSIONS**

THESE

Pour le

DOCTORAT VÉTÉRINAIRE

Présentée et soutenue publiquement devant

LA FACULTE DE MEDECINE DE CRETEIL

Le 1^{er} Mars 2007

par

Myriam DOUCET

Née le 22 Août 1980 à Ambert (Puy-de-Dôme)

JURY

Président : M.

Professeur à la Faculté de Médecine de CRETEIL

Membres

Directeur : Mme Nathalie CREVIER-DENOIX

Professeur à l'École Nationale Vétérinaire d'Alfort

Assesseur : M. Jean-Marie DENOIX

Professeur à l'École Nationale Vétérinaire d'Alfort

Invité : M. Philippe POURCELOT

Remerciements

A Monsieur le Professeur

Professeur de la faculté de médecine de Créteil

Qui m'a fait l'honneur de présider mon jury de thèse.

A Madame le Professeur Nathalie CREVIER-DENOIX,

Professeur d'anatomie de l'Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort

Qui m'a fait l'honneur de diriger cette thèse, qui m'a accueillie avec bienveillance, formée et conseillée.

A Monsieur le professeur Jean-Marie DENOIX,

Professeur en clinique équine à l'Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort et directeur du CIRALE

Qui m'a fait l'honneur de participer à mon jury de thèse.

Veillez accepter tous mes sincères remerciements

A Monsieur Philippe Pourcelot

Ingénieur-Chercheur de l'UMR BPLC

Qui m'a fait l'honneur de participer à mon jury de thèse.

Pour son aide précieuse, ses explications et sa patience.

A toute l'équipe de l'UMR BPLC, en particulier Guy et Sylvain,

Pour leur aide et leur gentillesse.

A l'Association Nationale du Selle Français et à tous les éleveurs,

Pour m'avoir accueillie. Je suis désolée de ne pas avoir pu vous fournir les résultats.

La méthode de mesure morphométrique 3D a été développée grâce au soutien de l'INRA (Institut National de la Recherche Agronomique) et de la DGER (Direction Générale de l'Enseignement et de la Recherche du Ministère de l'Agriculture).

L'application de cette méthode sur des effectifs de chevaux Selle Français a été menée en partenariat avec l'Association Nationale du Selle Français, et avec le soutien des Haras nationaux.

A mes parents,

Pour leur soutien et leur amour inconditionnels. Merci d'avoir supporté mes petits défauts et mes animaux sans avoir (trop) râlé. Merci d'être toujours là, pas trop près, pas trop loin. Merci pour tout.

A Carole

Ma sœur adorée. Merci d'être là, depuis toujours, tout simplement. A Lison et au petit bout qui va bientôt pointer son nez. A Vincent, qui y a cru. Je regrette de ne pas vous voir plus souvent.

A Vincent

Merci pour ton amour. Merci pour toutes ces petites choses qui font que c'est toi. Merci pour ta persévérance, ton soutien et ta patience. Je suis si fier de toi. A tout ce qui nous attend ! Je t'aime.

A ma famille,

A mémé Coco et pépé Maurice, je vous aime et vous me manquez. A mémé Jeanne et pépé Gérard que je ne vois pas assez souvent. A mes oncles et tantes, vous qui êtes tous si gentils et drôles. A mes cousins et cousines, c'est toujours un plaisir trop rare de vous retrouver. A Denis.

A mes amis

A Maylis, Rémi, Karen et François, Sophie et tous ceux de notre petite bande, pour vos différences qui sont autant de richesses, pour les soirées de fous rires, pour avoir toujours ouvert votre porte, pour votre amitié qui m'est si précieuse.

A Sylvie, Marie-Laure, Elodie, Nathalie, Anne. Vous me manquez les filles. Merci d'avoir été là dans les moments difficiles, de m'avoir toujours soutenue et d'y avoir cru quand je doutais. Mais surtout merci pour les fabuleux souvenirs et votre douce folie que j'adore.

A mes amies d'enfance, Célia et Isabelle. Chacune à votre manière, vous êtes extraordinaires. Vous comptez énormément pour moi. J'aimerais tant vous voir plus souvent.

A tous ceux que je n'ai pas cités et qui comptent.

PRÉSENTATION ET ÉVALUATION D'UNE MÉTHODE DE MESURE MORPHOMÉTRIQUE EN TROIS DIMENSIONS

NOM et Prénom : DOUCET Myriam

Résumé :

Cette thèse porte sur une nouvelle méthode de quantification de la conformation du cheval (morphométrie). La première partie, bibliographique, présente les méthodes utilisées jusqu'à présent. Mesurer la conformation d'un grand effectif de chevaux de manière quantitative n'était possible jusqu'ici qu'avec des méthodes photométriques, qui ne peuvent fournir que des mesures en 2D et imposent l'utilisation de marqueurs cutanés. La nouvelle méthode de mesure morphométrique 3-D dont la présentation et l'évaluation font l'objet de cette thèse, consiste à filmer les chevaux au pas, sans marqueurs, à l'aide de quatre caméras vidéo. Les films sont ensuite numérisés et synchronisés. Une série de quatre images est sélectionnée pour chacune des deux positions de référence (antérieure et postérieure). Vingt-huit repères anatomiques sont ensuite relevés, c'est-à-dire localisés sur au moins deux des quatre images de chaque série. La calibration des images permet d'obtenir les coordonnées 3-D de ces repères, à partir desquelles 400 paramètres morphométriques sont calculés de façon automatique. La dernière partie de cette thèse présente une évaluation de cette méthode, en particulier sous l'angle de la répétabilité des mesures.

Mots clés :

MORPHOMETRIE
CONFORMATION
MESURE 3-D
VIDEO
CHEVAL
APLOMBS

Jury :

Président : Pr.
Directeur : Pr. Nathalie CREVIER-DENOIX
Assesseur : Pr. Jean-Marie DENOIX
Invité : M. Philippe POURCELOT

Adresse de l'auteur :

Mlle Myriam DOUCET
15, le Haut d'Aubignat
63 600 St Ferréol des cotes

PRESENTATION AND EVALUATION OF A METHOD OF THREE-DIMENSIONS MORPHOMETRIC MEASUREMENT

SURNAME : DOUCET

Given name : Myriam

Summary :

This thesis deals with a new method of horse conformation quantification (morphometry). The first part is a literature review, and presents the methods used until now. Measuring quantitatively the conformation of a large number of horses was possible so far only with photometric methods, which can supply only 2-D measures and require skin markers. The new 3-D morphometric measurement method consists of filming horses walking, without marker, with four video cameras. Then, films are digitized and synchronized. A set of four video frames is selected for each reference positions (forelimb, hind limb). Twenty-eight anatomical landmarks are then located at least on two frames among the four frames of each set. After frames calibration, the points' 3-D coordinates of the twenty-eight landmark are obtained ; from these coordinates, 400 morphometric parameters are automatically calculated. The last part of this thesis presents an evaluation of this method, especially in terms of repeatability of the measurements.

Keywords :

MORPHOMÉTRIE
CONFORMATION
3-D MEASUREMENT
VIDEO
HORSE
STANDING CONFORMATION

Jury :

President : Pr.
Director : Pr. Nathalie CREVIER-DENOIX
Assessor : Pr. Jean-Marie DENOIX
Guest : M. Philippe POURCELOT

Author's address:

Miss Myriam DOUCET
15, le Haut d'Aubignat
63 600 St Ferréol des cotes
France

Table des matières

Table des matières	1
Index des figures.....	5
Index des tableaux	7
Index des annexes.....	7
INTRODUCTION.....	9
1 ^{ERE} PARTIE :	
REVUE DE LITTERATURE : EVALUATION DE LA CONFORMATION ...	11
<u>I. Méthodes subjectives.....</u>	<u>15</u>
1. Principe.....	15
2. Avantages, inconvénients.....	15
3. Résultats	16
<u>II. Méthodes objectives.....</u>	<u>17</u>
A. Méthodes directes	17
B. Méthodes indirectes : méthodes photométriques	18
1. Méthodes photométriques initiales.....	18
2. Méthode photométrique dérivée.....	22
3. Méthode apparentée aux méthodes photométriques	24
<u>Conclusion</u>	<u>26</u>

2^{EME} PARTIE :

PRESENTATION DE LA METHODE MORPHOMETRIQUE EN 3

DIMENSIONS.....	29
<u>I. Enregistrements.....</u>	<u>31</u>
A. Matériels	31
1. Caméras	31
2. Structure de calibration.....	31
B. Protocole d'enregistrement	34
1. Préparation de l'enregistrement.....	34
2. Enregistrement de la structure de calibration des caméras.....	35
3. Procédure d'enregistrement des chevaux	35
<u>II. Traitement et analyse des enregistrements</u>	<u>35</u>
A. Matériels	35
B. Protocole de traitement et d'analyse des enregistrements	36
1. Synchronisation des quatre films.....	36
2. Sélection des images de référence	36
3. Relevé de la structure de calibration.....	39
4. Relevé des repères anatomiques	42
5. Calcul des paramètres morphométriques.....	53
<u>III. Discussion.....</u>	<u>53</u>
A. Enregistrements sur le terrain	53
B. Traitement et analyse des enregistrements	54
1. Synchronisation	54
a) <i>Système du « genlock »</i>	55
b) <i>L'enregistrement directement sur un ordinateur</i>	55
2. Calibration	56
3. Relevés des repères anatomiques	58
a- Qualité du relevé des repères anatomiques	58

1- <i>Qualité générale du relevé</i>	58
2- <i>Repères anatomiques</i>	60
b- <i>Améliorations envisageables</i>	63
<u>Conclusion</u>	<u>64</u>

3^{EME} PARTIE :

EVALUATION DE LA METHODE 3-D	65
<u>I. Evaluations préliminaires</u>	<u>65</u>
A. Justesse de la méthode	65
B. Evaluation expérimentale préliminaire de la méthode	66
1. Comparaison des résultats obtenus au pas, canon vertical, et au placer	66
2. Comparaison des résultats obtenus avec et sans marqueurs cutanés	67
<u>II. Etude de la répétabilité des mesures</u>	<u>69</u>
A. Résultats	69
1. Coordonnées des repères anatomiques	69
2. Paramètres morphométriques	75
a- Les distances	75
1- <i>Les hauteurs</i>	75
2- <i>Les longueurs</i>	77
3- <i>Les largeurs</i>	80
b- Les angles 3-D	83
1- <i>Les angles articulaires</i>	83
2- <i>Les angles de certains segments par rapport à l'horizontale</i>	87
3- <i>L'orientation des rayons osseux des membres par rapport à la verticale</i>	90
B. Discussion	92
1. Coordonnées des repères anatomiques	92
2. Paramètres morphométriques	93

a-Distances	93
1- Hauteurs	93
2- Longueurs	94
3- Largeurs	95
b-Angles	96
1- Angles articulaires	96
2- Les angles de certains segments par rapport à l'horizontale.....	96
3- L'orientation des rayons osseux des membres par rapport à la verticale.....	97
<u>Conclusion.....</u>	<u>97</u>
CONCLUSION GENERALE.....	99
Références bibliographiques.....	101
Annexe 1 : Résultat de l'étude de la répétabilité sur les coordonnées 3-D des repères anatomiques.	106
Annexe 2 : Résultat de l'étude de la répétabilité sur les paramètres morphométriques.	109

Index des figures

<i>Figure 1 : Définitions de justesse et de fidélité.....</i>	<i>13</i>
<i>Figure 2 : Illustration par deux exemples de l'erreur que peut produire un rapport hauteur/largeur différent de 1 lorsque les mesures en pixels sont converties en mesures physiques.....</i>	<i>23</i>
<i>Figure 3 : Structure de calibration utilisée en 2002.....</i>	<i>32</i>
<i>Figure 4 : Structure de calibration utilisée à partir de 2003.....</i>	<i>32</i>
<i>Figure 5 : Coordonnées connues de la structure de calibration utilisée depuis 2003.....</i>	<i>33</i>
<i>Figure 6 : Disposition des caméras par rapport à la structure de calibration.....</i>	<i>34</i>
<i>Figure 7 : Images de référence du membre antérieur (IR-Ant).....</i>	<i>37</i>
<i>Figure 8 : Images de référence du membre postérieur (IR-Post).....</i>	<i>38</i>
<i>Figure 9 : Images de la structure de calibration chargées avec le logiciel Calibrateur.....</i>	<i>40</i>
<i>Figure 10 : Images de la structure de calibration relevées sous le logiciel Calibrateur.....</i>	<i>41</i>
<i>Figure 11 : Images de référence du membre antérieur (IR-Ant) chargée avec le logiciel Conformeur.....</i>	<i>43</i>
<i>Figure 12 : Détail de l'image de référence du membre antérieur (IR-Ant) chargée avec le logiciel Conformeur : image de la caméra 3.....</i>	<i>44</i>
<i>Figure 13 : Repères anatomiques de l'image de référence du membre antérieur (IR-Ant) et correspondance avec les numéros. Vue de profil.....</i>	<i>45</i>
<i>Figure 14 : Repères anatomiques des images de référence du membre antérieur (IR-Ant) et du membre postérieur (IR-Post) et correspondance avec les numéros. Vues de face et de derrière.....</i>	<i>46</i>
<i>Figure 15 : Repères anatomiques de l'image de référence du membre postérieur (IR-Post) et correspondance avec les numéros. Vue de profil.....</i>	<i>47</i>
<i>Figure 16 : Images de référence du membre antérieur (IR-Ant) chargées avec le logiciel Conformeur.....</i>	<i>48</i>
<i>Figure 17 : Détails des images de référence du membre antérieur (IR-Ant) chargées avec le logiciel Conformeur : détail de l'image de la caméra 3.....</i>	<i>49</i>

<i>Figure 18 : Images de référence du membre postérieur (IR-Post) chargées avec le logiciel Conformeur.....</i>	<i>50</i>
<i>Figure 19 : Détails des images de référence du postérieur chargées avec le logiciel Conformeur : détail de l'image de la caméra 3.....</i>	<i>51</i>
<i>Figure 20 : Exemple de décalage vertical important entre l'image de calibration (à gauche) et l'image de référence (à droite).</i>	<i>57</i>
<i>Figure 21 : Illustration d'un exemple de difficultés de localisation des repères anatomiques du membre distal.</i>	<i>61</i>
<i>Figure 22 : Représentation des hauteurs calculées en 3-D à partir des IR-Ant sur une vue de profil.....</i>	<i>76</i>
<i>Figure 23 : Représentation des hauteurs calculées en 3-D à partir des IR-Post sur une vue de profil.....</i>	<i>76</i>
<i>Figure 24 : Représentation des longueurs calculées en 3-D à partir des IR-Ant sur une vue de profil.....</i>	<i>78</i>
<i>Figure 25 : Représentation des distances horizontales et verticales calculées en 3-D à partir des IR-Ant sur une vue de profil.....</i>	<i>79</i>
<i>Figure 26 : Représentation des longueurs calculées en 3-D à partir des IR-Post sur une vue de profil.....</i>	<i>81</i>
<i>Figure 27 : Représentation des distances horizontales et verticales calculées en 3-D à partir des IR-Post sur une vue de profil</i>	<i>82</i>
<i>Figure 28 : Représentation des angles articulaires calculés en 3-D à partir des IR-Ant sur une vue de profil</i>	<i>84</i>
<i>Figure 29 : Représentation des angles articulaires calculés en 3-D à partir des IR-Post sur une vue de profil, 1^{ère} partie</i>	<i>85</i>
<i>Figure 30 : Représentation des angles articulaires calculés en 3-D à partir des IR-Post sur une vue de profil, 2^{ème} partie.....</i>	<i>86</i>
<i>Figure 31 : Représentation sur une vue de profil des angles de certains segments (IR-Ant) par rapport à l'horizontale calculés en 3-D</i>	<i>88</i>
<i>Figure 32 : Représentation sur une vue de profil des angles de certains segments (IR-Post) par rapport à l'horizontale calculés en 3-D</i>	<i>89</i>

Index des tableaux

<i>Tableau 1 : Ecart-types (cm) des coordonnées des repères anatomiques de la tête et de l'encolure calculées en 3-D.....</i>	<i>70</i>
<i>Tableau 2 : Ecart-types (cm) des coordonnées des repères anatomiques de la partie distale des membres calculées en 3-D.....</i>	<i>71</i>
<i>Tableau 3 : Ecart-types (cm) des coordonnées des repères anatomiques de la partie proximale des membres calculées en 3-D.....</i>	<i>73</i>
<i>Tableau 4 : Ecart-types (cm) des coordonnées des repères anatomiques du dos et du passage de sangle calculées en 3-D.....</i>	<i>74</i>
<i>Tableau 5 : Moyenne, écart-types (σ) et coefficient de variation (CV) des angles de certains segments par rapport à la verticale calculés en 3-D</i>	<i>91</i>

Index des annexes

<i>Annexe 1 : Résultats de l'étude de la répétabilité sur les coordonnées 3-D des repères anatomiques</i>	<i>106</i>
<i>Annexe 2 : Résultats de l'étude de la répétabilité sur les paramètres morphométriques.....</i>	<i>109</i>

Introduction

Les cavaliers, les entraîneurs et les propriétaires attendent des chevaux de sport qu'ils aient une carrière sportive réussie, c'est-à-dire qu'ils soient performants mais aussi qu'ils aient une longue durée de vie sportive car ils n'atteignent le maximum de leur potentiel sportif qu'à 10-15 ans. Leur objectif est donc d'identifier le plus tôt possible les chevaux possédant ces qualités afin d'éviter un long entraînement et un investissement financier important sur un jeune cheval qui ne pourra pas supporter les contraintes que sa carrière va impliquer. Un jeune cheval est souvent repéré sur son ascendance (le pedigree) et sur sa conformation. La conformation (ou morphologie) décrit la forme du cheval, et les caractéristiques de la conformation (ou paramètres morphométriques) comprennent les distances (longueurs, hauteurs, largeurs), les angles (angles articulaires, orientation de segments par rapport à la verticale ou à l'horizontale) et les circonférences. Les acteurs de la filière équine ont toujours mis en relation de manière empirique la conformation avec la performance et la longévité. Il y a peu de données objectives et quantitatives disponibles sur ces relations conformation/performance et conformation/longévité. Obtenir des données objectives sur ces relations nécessite en premier lieu d'obtenir des données objectives sur la conformation. En 1996, BELLOY et BATHE soulignaient le besoin d'une méthode de mesure morphométrique quantitative, objective et fiable, notamment pour les éleveurs, afin d'obtenir des données scientifiques fiables sur un standard de conformation et sur l'héritabilité des paramètres morphométriques. Ils soulignaient également qu'une quantification de la relation entre la conformation et la longévité permettrait une amélioration des conseils que les vétérinaires seraient susceptibles d'offrir à leurs clients. Depuis, aucun progrès majeur n'a été effectué dans l'évaluation de la conformation.

En 1999-2000, l'UMR BPLC de l'ENVA-INRA¹ a mis au point une méthode de mesure morphométrique en 3 dimensions (3-D) capable de recueillir des données objectives et quantitatives sur la conformation, et ceci sur un grand nombre de chevaux. En 2001, une association d'éleveurs, l'Association Nationale du Selle Français (ANSF) a demandé à l'UMR de mettre ses compétences au service de la sélection du cheval Selle Français, dans le cadre de son programme d'élevage. Ce programme a deux objectifs généraux :

- Fournir les bases de données scientifiques d'un programme de sélection rationnel pour ce qui a trait au « modèle » (héritabilité, corrélations conformation/performance et conformation/longévité).
- Mettre, à terme, à la disposition des Haras nationaux et de l'ANSF une technique dont ils pourront maîtriser eux-mêmes l'exploitation.

Deux études à large échelle ont alors été mises en œuvre. L'une d'entre elles porte sur le suivi longitudinal de la croissance d'une population de poulains, en particulier le suivi de l'évolution des aplombs. Dans ce cadre, j'ai participé aux enregistrements sur le terrain et au traitement des données. Je connais donc cette méthode de mesures morphométriques en 3-D pour l'avoir utilisée.

L'objectif de cette thèse est de permettre aux futurs utilisateurs de bien connaître la méthode de mesure morphométrique en 3-D et de s'en servir de manière optimale.

Ce travail est divisé en 3 parties : la première partie, bibliographique, met en évidence l'originalité et la pertinence de la méthode de mesure morphométrique en 3-D. Les différentes étapes de son protocole sont ensuite présentées et discutées dans une seconde partie. Enfin, la troisième et dernière partie de cette thèse est consacrée à l'évaluation de la méthode et notamment à l'évaluation de la répétabilité des mesures.

¹ Unité Mixte de Recherche de Biomécanique et Pathologie Locomotrice du Cheval. Cette équipe de recherche comprend à la fois des enseignants-chercheurs de l'École nationale Vétérinaire d'Alfort et des ingénieurs de l'Institut National de la Recherche Agronomique.

1^{ère} Partie :

Revue de littérature : Evaluation de la

conformation

La conformation a toujours été considérée comme un indicateur de la performance et de la bonne condition physique du cheval. Le vaste traité *De re equestri* par l'historien et le philosophe grec XENOPHON (430-354 BC) est la première source écrite sur l'élevage des chevaux. Il décrit en détail ce qu'est une bonne et une mauvaise conformation. Il met directement en relation la conformation avec la fonction, aussi bien en termes d'aptitude à la performance, qu'en termes de robustesse ou de longévité. Les intuitions et les opinions de XENOPHON étaient fondées empiriquement comme l'étaient celles de ses lointains successeurs, les « grands écuyers » du 17^e et 18^e siècles : CAVENDYSH en 1674, DE SOLLEYSEL en 1733 et BOURGELAT en 1750, d'après VAN WEEREN et CREVIER-DENOIX (2006).

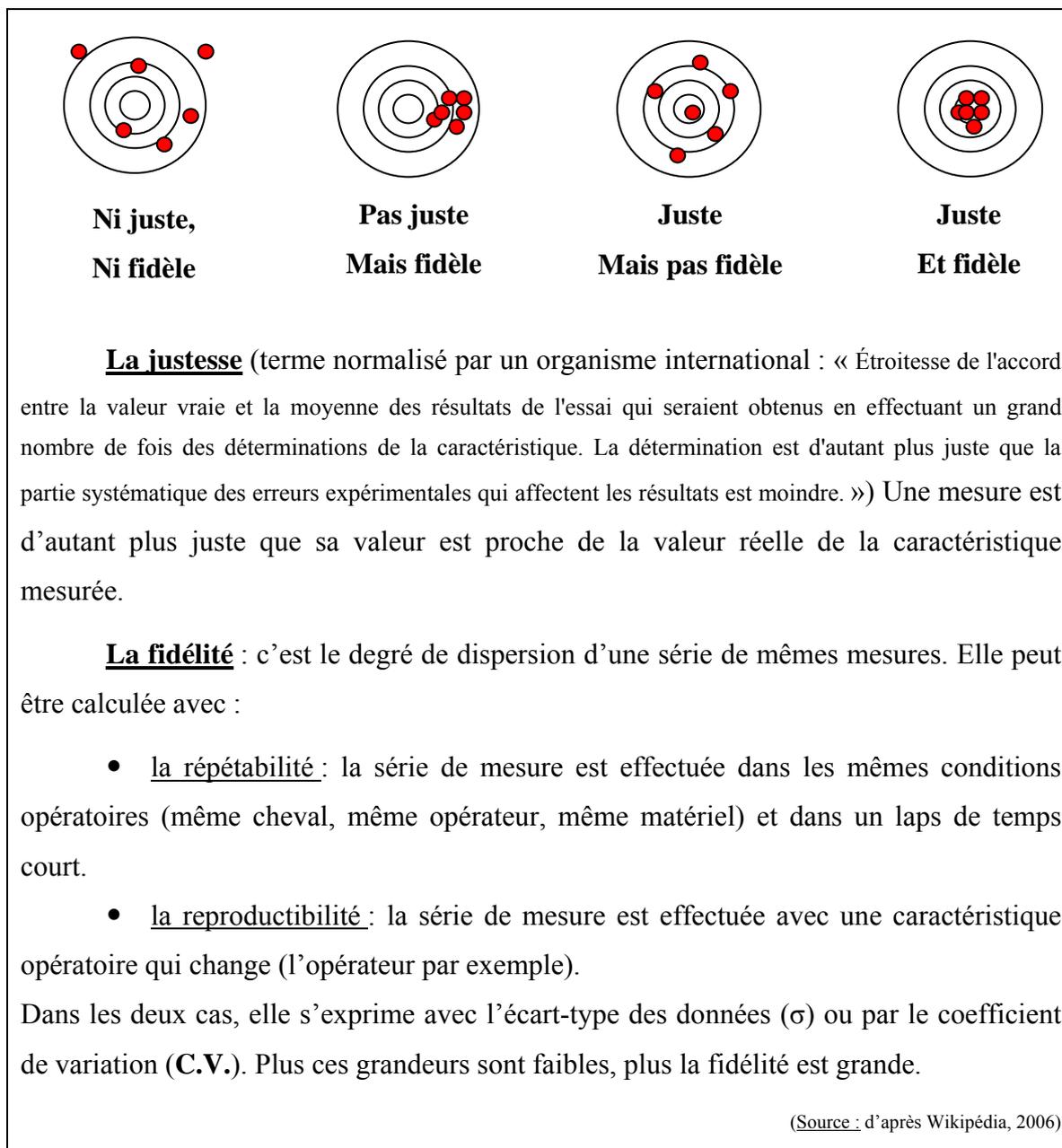
A des époques plus récentes, la pensée scientifique a considérablement évolué et les moyens techniques se sont énormément améliorés. Cependant, à part quelques initiatives louables, les recherches dans ce domaine ont été limitées jusqu'à présent. L'estimation de la conformation du cheval est toujours largement basée sur des critères subjectifs fondés sur des éléments empiriques. Afin d'évaluer de façon objective la relation entre la conformation et la performance ou la longévité, deux conditions doivent être satisfaites :

- Premièrement, des données quantitatives concernant la performance ou des données épidémiologiques fiables concernant la nature et l'incidence des lésions doivent être disponibles. Les indices et le classement sont quantitatifs par nature dans la plupart des disciplines équestres et, bien qu'il y ait bien d'autres facteurs que le cheval lui-même qui déterminent le succès dans une compétition équestre, ces informations quantitatives sont des paramètres qui conviennent quand elles sont utilisées dans des groupes

suffisamment grands. Des informations quantitatives sur la longévité sont moins facilement disponibles, mais l'épidémiologie du cheval est en plein essor et le nombre d'études rétrospectives et prospectives qui tentent d'identifier les facteurs de risque de diverses affections ont augmenté considérablement ces dernières années VAN WEEREN et CREVIER-DENOIX (2006).

- Deuxièmement, la conformation devrait idéalement pouvoir être quantifiée d'une façon précise, c'est-à-dire juste et fidèle (Fig. 1), sur un nombre de chevaux suffisamment grand pour permettre une analyse statistique. C'est cette dernière condition qui pose le plus de problème. Plusieurs types de méthodes ont été développés pour l'évaluation de la conformation, avec des qualités inégales.

Figure 1 : Définitions de justesse et de fidélité.



I. Méthodes subjectives

1. Principe

L'évaluation de la conformation repose de façon traditionnelle sur un simple examen visuel du cheval au placier, et éventuellement en mouvement. Cette évaluation est pratiquée aujourd'hui dans les concours « Modèle et Allures » des jeunes chevaux. Bien que proches, les protocoles de tels concours varient en fonction des pays. En général, l'évaluation consiste à noter des critères de manière linéaire (conformation, qualité des allures et du saut, statut orthopédique et médical, ...). La conformation tient une place plus ou moins importante dans l'examen.

2. Avantages, inconvénients

Cette appréciation est subjective par essence puisque fondée sur l'expérience et l'opinion. MAGNUSSON (1985), en introduction de son étude, a fait évaluer les mêmes chevaux à plusieurs juges expérimentés. Il observe que bien qu'un accord soit obtenu pour les caractéristiques générales, de grands désaccords sont révélés pour la plupart des détails de la conformation. D'après lui, VAN VLECK *et al.* en 1965 et GRUNDLER *et al.* en 1980 ont confirmé ces résultats par d'autres études sur la reproductibilité avec plusieurs juges évaluant le même animal. Les résultats de ce type de concours ont été utilisés par KOENEN *et al.* en 1995 pour estimer la corrélation entre des paramètres phénotypiques et génotypiques de la conformation, et les performances en obstacle et en dressage chez les chevaux de race KWPN. Ils concèdent eux-mêmes que les notations sont peu reproductibles. En améliorant cette reproductibilité, dans ce cas en n'utilisant que des juges très expérimentés, ils admettent que les héritabilités qu'ils ont estimées varieraient vraisemblablement. En 1996, MAWDSLEY *et al.* s'inspirent du programme d'évaluation mené chez les vaches laitières, décrit dans les années 70 par l'association américaine de la race Holstein. Ils ont mis au point une méthode qui comprend une notation linéaire de 1 à 7 pour 20 paramètres de la conformation du cheval. Ils ont évalué la répétabilité sur 4 chevaux différents avec 10 séries de mesures réparties sur 7 jours (σ

= 0-2 points). Ils ont exploité les résultats des paramètres ayant une répétabilité qu'ils jugent convenable ($\sigma = 0-0,43$ points). Mais la répétabilité est trop faible pour des paramètres très importants de la conformation comme certains aplombs.

L'évaluation de la conformation avec cette méthode peut être effectuée sur un grand nombre de chevaux. Cependant elle est semi-quantitative, et a une répétabilité et une reproductibilité faibles. Elle est donc à la fois peu juste et peu fidèle.

3. Résultats

En 2001, WALLIN *et al.* ont exploité les résultats de concours de type « Modèle et Allures » concernant les chevaux de selle suédois. L'évaluation comprend des paramètres de conformation, de performance et de santé évalués de manière linéaire par une notation de 1 à 10. Leur étude avait pour objectif d'établir une relation entre ces résultats et la longévité. Ils ont démontré qu'avec le statut orthopédique et le sexe, la conformation et les aplombs avaient une influence claire sur la longévité. Une notation excellente sur la conformation et les aplombs augmente significativement ($p < 0.05$) la longévité du cheval et inversement, les chevaux dont les notes sont les plus mauvaises ont deux fois plus de risque d'être réformés. Cependant, les notations ont nécessité un ajustement en fonction des années et des juges.

II. Méthodes objectives

Elles s'appuient toutes sur la notion de repères anatomiques. Cette notion a été développée pour la première fois par SMALTZ en 1906 (d'après MAGNUSSON, 1985). Utiliser des repères anatomiques précis permet de systématiser les mesures et de limiter les variations entre les opérateurs, ce qui est très important quand les mesures sont faites sur un grand nombre de chevaux. Les repères anatomiques sont choisis en fonction de plusieurs critères. Premièrement, ils doivent être situés sur le squelette et faciles à repérer par palpation. Ils doivent également être situés pertinemment par rapport aux paramètres mesurés (par exemple, à l'extrémité d'un segment osseux si l'on veut déterminer la longueur de celui-ci). Enfin, les repères et les lignes qui les relie doivent coïncider si possible avec les repères et les axes utilisés dans l'évaluation subjective, afin de permettre une traduction d'une évaluation à l'autre.

Ces dernières années, la grande majorité des auteurs ont choisi de mesurer les paramètres morphométriques d'un seul côté du cheval, en prenant comme hypothèse que le cheval était symétrique.

A. Méthodes directes

Elles sont les premières à avoir été utilisées, entre autres par LEONARD DE VINCI au 15^e siècle et CLAUDE BOURGELAT au 18^e (MAGNUSSON, 1985a). Elles consistent à mesurer manuellement les paramètres morphométriques directement sur le cheval. On utilise des instruments tels que la toise pour les hauteurs, la canne de Lyndtin (toise à deux potences) pour les longueurs, le compas d'épaisseur (sorte de pied à coulisse géant), le ruban métrique pour les circonférences, le pied à coulisse pour les mesures plus fines, le « saumurien », sorte de mètre ruban plombé coulissant dans une plaque pour la mesure du vide sous-sternal, l'arthrogoniometre pour mesurer les angles articulaires...

La justesse d'une méthode directe est limitée par les difficultés pratiques des mesures directes (manipulation des instruments, positionnement du cheval,...). Néanmoins, les mesures directes ont l'avantage d'être proches des dimensions réelles.

Des méthodes directes ont donc été utilisées comme méthodes de référence par MAGNUSSON (1985a) et HUNT *et al.* (1999) pour évaluer la justesse de leurs méthodes respectives. MAGNUSSON a également étudié la répétabilité d'une méthode directe en répétant 15 séries de 21 mesures avec une méthode de mesures directe ($\sigma = 0-0,8$ cm, $n=3$). Il insiste sur la nécessité de mesurer les chevaux dans une position de référence car la position du cheval peut énormément modifier les mesures. MAWDSLEY *et al.* (1996) ont utilisé des mesures directes pour 6 paramètres de la conformation et ont calculé leurs répétabilité sur 4 chevaux ($\sigma = 0,07-1,97$ cm, $n=10$). Les méthodes directes sont assez justes et relativement fidèles. Mais, pour des raisons pratiques, les angles sont très difficiles à mesurés avec une méthode directe. De plus, ils sont mesurés les uns après les autres, rendant possible une variation de la position du cheval entre deux mesures. Le principal défaut de ce type de méthode est la lourdeur des protocoles qui rend leur mise en oeuvre difficile sur de grands effectifs. De nos jours, des études utilisant uniquement des mesures directes sont peu nombreuses, les méthodes indirectes leur sont préférées.

B. Méthodes indirectes : méthodes photométriques

Ces dernières décennies, la grande majorité des travaux d'analyse morphométrique a utilisé des méthodes photographiques avec marqueurs, dites méthodes photométriques. Leur protocole consiste à placer des marqueurs cutanés sur le cheval au niveau de repères anatomiques. L'animal est ensuite photographié de profil avec une toise. Il doit se tenir à l'arrêt dans la position du placer. Les mesures morphométriques s'effectuent dans un deuxième temps sur l'image. La toise sert d'échelle de référence. Les mesures sont donc réduites à deux dimensions.

1. Méthodes photométriques initiales

Ce type de méthode a été utilisé dès 1978 par LANGLOIS *et al.* Ils obtenaient des diapositives qu'ils ont projetées sur un écran. Les mesures morphométriques étaient effectuées manuellement sur l'écran de projection. Les longueurs mesurées sont converties en longueurs réelles par l'intermédiaire de la toise. Les mesures directes restaient nécessaires pour les épaisseurs, les largeurs et les circonférences. Il a évalué la

répétabilité de sa méthode en soumettant soixante chevaux deux fois au protocole à plusieurs jours d'intervalle. Il a trouvé une bonne répétabilité dans l'ensemble.

MAGNUSSON (1985a) décrit en détail une autre méthode photométrique avec marqueurs. Le principe reste le même, mais il photographie une toise verticale et une toise horizontale avec le cheval. Les repères anatomiques sont différents. MAGNUSSON a surtout entrepris un grand travail d'évaluation de sa méthode, ce qui lui a permis de l'optimiser et de décrire de manière objective ses points forts et ses points faibles. Elle a ensuite été utilisée dans de nombreux travaux (HOLMSTRÖM *et al.*, 1990 ; HOLMSTRÖM et PHILIPSSON, 1993).

- Justesse, fidélité

MAGNUSSON (1985a) a évalué sa méthode en deux temps. Il a d'abord effectué une étude préliminaire dans laquelle il a constaté que la photographie entraîne deux types d'erreurs. Premièrement, la projection en deux dimensions entraîne des erreurs géométriques qui modifient les distances et les angles. Il a limité cette déformation par un choix précis de la lentille de l'appareil photographique et en augmentant la distance entre l'appareil et le cheval. Il insiste sur ces réglages et soutient que s'ils ne sont pas respectés, la méthode ne peut pas être considérée comme entièrement objective. Deuxièmement, une déviation de l'angle entre l'appareil photographique et le cheval provoque une distorsion des mesures. L'appareil photographique doit viser le cœur du cheval et être placé à la même hauteur que celui-là. Enfin, le cheval doit être perpendiculaire à l'axe de l'objectif. Il souligne l'importance de mesurer le cheval en position standardisée par rapport à l'appareil photographique.

Dans un deuxième temps, il a évalué expérimentalement sa méthode en effectuant 5 enregistrements sur le même cheval. Pour chaque enregistrement, il a placé les marqueurs cutanés, puis il a mesuré le cheval avec une méthode directe et avec la méthode photométrique. Concernant l'exactitude de sa méthode, il a comparé les moyennes des résultats de chaque méthode (coefficient de corrélation = 0,61-1). MAGNUSSON explique la diminution de la justesse par le passage en deux dimensions. Grâce au réglage de l'appareil photographique, cette différence n'est pas significative. Concernant la fidélité de sa méthode, MAGNUSSON a utilisé ces mêmes résultats pour calculer la répétabilité de sa méthode photométrique ($\sigma = 0,16-1,36$ cm et $\sigma = 0,4-1,8^\circ$,

n= 5). MAGNUSSON a identifié la position du cheval comme la principale source d'erreur systématique. Une variation même faible de la position du cheval entraîne une variation des angles articulaires et une déviation de la position des marqueurs cutanés. En effet, les marqueurs sont placés sur la peau et une modification même faible de la position du cheval entre le moment où l'on place les marqueurs et le moment où le cheval est mesuré, peut éloigner les marqueurs des repères anatomiques, osseux le plus souvent, en regard desquels ils ont été placés. Or LACROIX (1999) a démontré que le placer est une position variable, y compris sur un même individu. Afin de limiter cette variabilité, MAGNUSSON a défini très précisément pour son étude la position de référence en prenant en compte la position des membres et leur mise en charge. D'après lui, cette position nécessite d'étudier une dizaine de positions spontanées avant de pouvoir effectuer les mesures. La répétabilité obtenue alors est relativement bonne.

Ce type de méthode est moins lourd à mettre en œuvre que les méthodes directes. Cependant, il est nécessaire d'étudier une dizaine de positions spontanées avant de pouvoir effectuer les mesures et il y a un temps incompressible de préparation du cheval lié à la pose des marqueurs. Le temps de mesure est donc encore long. Mais la méthode de MAGNUSSON est juste et reste fidèle si la position standard du cheval est rigoureusement respectée.

▪ Résultats

LANGLOIS *et al.* (1978) ont étudié la relation entre conformation et capacité au saut d'obstacle. Ils ont montré l'existence d'une corrélation forte entre la hauteur au garrot d'autres paramètres de la conformation. Ils n'ont pas ajusté ces résultats à la hauteur au garrot comme les études suivantes le feront. Ils ont néanmoins démontré une différence de conformation faible mais significative entre un groupe de bons et de mauvais sauteurs. Les bons chevaux étaient caractérisés par la largeur de la poitrine et du bassin, une grande circonférence de poitrine, une croupe plus longue et un fémur plus incliné.

MAGNUSSON (1985b) a étudié la relation entre conformation et performance sur 500 trotteurs suédois âgés de 4 ans. Il a trouvé que plusieurs variables de la conformation chez les trotteurs de 4 ans varient en fonction du sexe : les juments sont plus petites et ont des corps plus longs, des canons antérieurs et des métacarpes plus étroits. Après

ajustement en fonction du sexe, il démontre qu'au moins 8 paramètres morphométriques ont une influence significative sur la performance des trotteurs. Il a également étudié la relation entre la conformation et la condition physique de ces mêmes trotteurs (MAGNUSSON, 1985b). Il a démontré qu'au moins 6 paramètres morphométriques ont une influence significative sur la condition physique, avec notamment un grand angle dorsal du jarret et de petits angles dorsaux des boulets antérieurs et postérieurs qui ont une influence positive.

HOLMSTRÖM *et al.* (1990) a repris la méthode développée par MAGNUSSON afin d'analyser et de comparer la conformation de chevaux de dressage et de saut d'obstacles de haut niveau avec celle d'une centaine de chevaux de quatre ans non sélectionnés et de 200 chevaux de club. Il a trouvé que la plupart de l'ensemble chevaux ont un corps long, que 60% d'entre eux ont au moins un des deux genoux en pied de banc, 50% ont des antérieurs cagneux et que 80% ont des postérieurs en rotation externe. La moitié de ces déviations sont qualifiées de « moyennes » à « modérées ». Ces auteurs ont démontré qu'il n'y avait pas de différence significative dans la prévalence de déviations modérées entre la conformation optimale des chevaux d'élite et la conformation de la population évoluant à bas niveau. Ils ont également démontré une influence du sexe sur la conformation. Les juments sont plus petites et après ajustement en fonction de la hauteur au garrot, elles ont un corps plus long et des membres plus courts. Les chevaux d'élite ont un angle dorsal du jarret plus grand, une scapula plus inclinée sur l'horizontale, un humérus plus long, un paturon plus large et une croupe plus plate que chez les chevaux évoluant à bas niveau. Les chevaux d'élite en saut d'obstacles ont également un angle dorsal du boulet antérieur plus petit. Sa principale conclusion est qu'un jarret avec un angle dorsal plus petit est plus susceptible d'être lésé et limite la capacité du cheval à se rassembler.

HOLMSTRÖM et PHILIPSSON (1993) ont étudié la relation entre la conformation, les performances et l'état physique de 195 chevaux de selle suédois de 4 ans. La conformation a été évaluée à la fois par la méthode de MAGNUSSON et par un jugement traditionnel subjectif. La performance a été estimée subjectivement par des notes d'allure et de saut monté. Ils ont en outre enregistré l'état physique (statut médical et orthopédique) des chevaux. Ils ont démontré l'existence de corrélations entre des

paramètres de la conformation et les notations des allures, de sauts montés et de l'état physique. Ils estiment qu'un fémur long et incliné vers l'avant est l'un des aspects de la conformation les plus importants. Un fémur long et incliné vers l'avant place les postérieurs sous le cheval, ce qui facilite leur fonctionnement et améliore l'équilibre.

2. Méthode photométrique dérivée

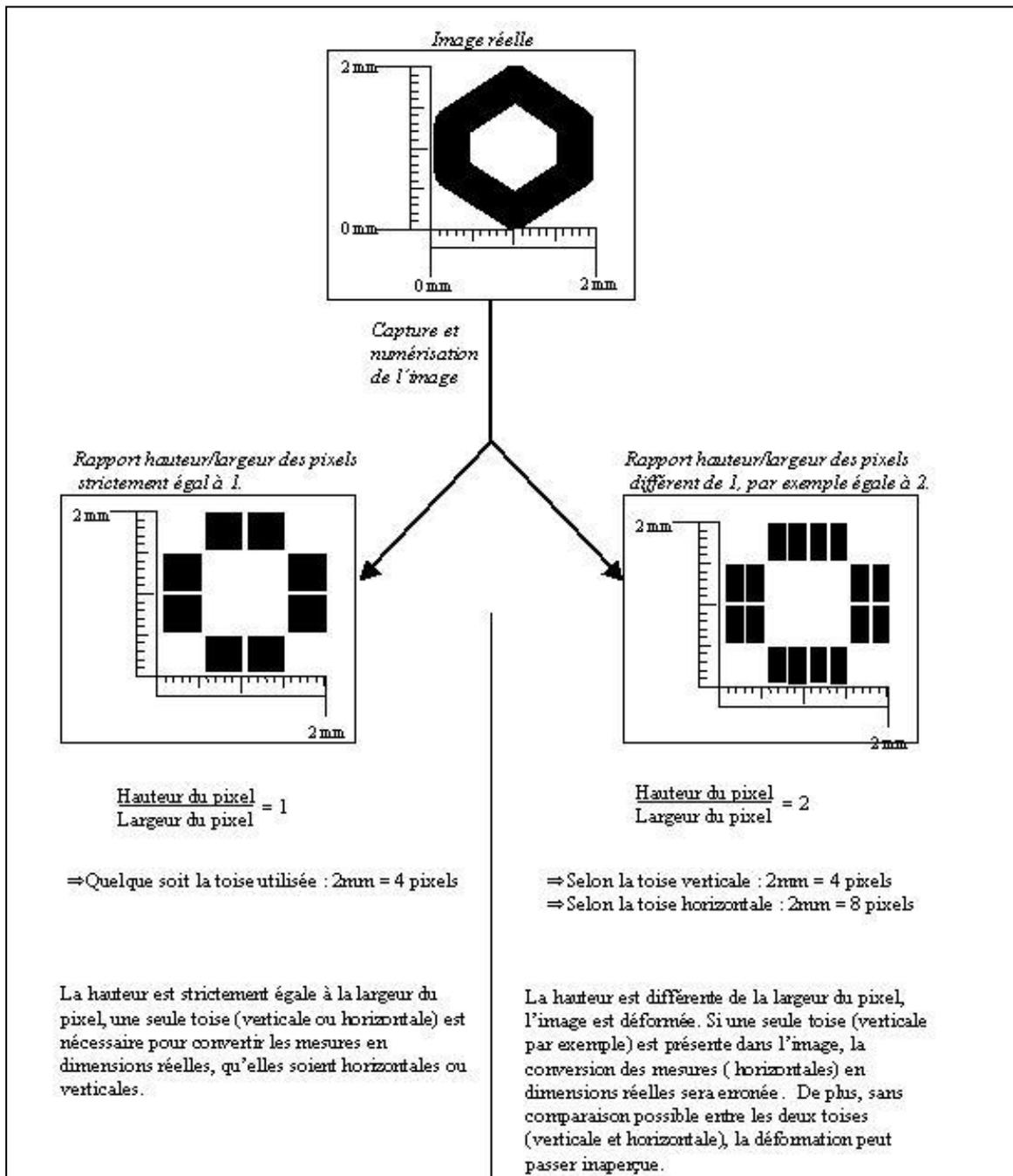
Plus récemment, ANDERSON et MCILWRAITH (2004) et ANDERSON *et al.* (2004) ont utilisé une méthode photométrique avec marqueurs sans aucune mesure directe, mais avec des photographies du cheval de face et de derrière. L'analyse des images est effectuée sur ordinateur après leur digitalisation. Les mesures de longueurs en pixels sont converties en longueurs réelles par l'intermédiaire d'une seule toise verticale prise en photo avec le cheval.

- Justesse, fidélité

La méthode utilisée par Anderson (ANDERSON et MCILWRAITH, 2004 ; ANDERSON *et al.*, 2004) s'appuie sur l'objectivité et la fiabilité des méthodes photométriques avec marqueurs démontrées par MAGNUSSON (1985). Cependant ils n'utilisent pas le réglage de l'appareil photographique décrit par MAGNUSSON. Ils remplacent les mesures manuelles par des mesures numériques. Or la digitalisation des photographies peut entraîner une diminution de la précision du fait de la compression des images, et en raison d'une résolution de l'image numérique insuffisante. Elle peut également entraîner des erreurs de conversion des mesures, comme le décrivent HUNT (1999) et BAILEY (1995), et comme expliqué sur la figure 2. Ces erreurs sont induites par une variation du rapport hauteur/largeur des pixels. La carte d'acquisition vidéo d'un ordinateur le fixe à 1. Les pixels sont alors carrés et il n'y a pas d'erreurs de conversion. Mais ce rapport est également influencé par la caméra ou l'appareil photographique numériques (disposition physique des éléments de détection sur le capteur CCD et la manière dont ces éléments sont lus). Ce rapport varie donc et il n'est plus exactement égal à 1. Les conversions des mesures peuvent alors induire des erreurs si cette variation est ignorée, comme dans ces études. De plus, l'existence d'un effet « année » dans leurs résultats montre qu'il y a un défaut de reproductibilité de la méthode à la fois sur certaines distances et certains angles. Pour toutes ces raisons cette méthode ne peut pas

être considérée comme totalement fiable. Une évaluation de la méthode aurait été la bienvenue.

Figure 2: Illustration par deux exemples de l'erreur que peut produire un rapport hauteur/largeur différent de 1 lorsque les mesures en pixels sont converties en mesures physiques. Sur des systèmes où le rapport est strictement égal à 1, une seule toise suffit à convertir de manière exacte des mesures qu'elles soient horizontales ou verticales. Mais souvent, ce rapport varie car il dépend de nombreux paramètres. Lorsqu'il est différent de 1, il peut induire une erreur dans la conversion des mesures. Un rapport égal à 2 est une exagération de cette variation pour l'exemple. (synthèse personnelle).



▪ Résultats

ANDERSON et MCILWRAITH (2004) ont étudié le développement longitudinal de la conformation d'un nombre non précisé de pur-sang du sevrage à l'âge de 3 ans, en les mesurant tous les ans à partir du sevrage, soit 4 fois en tout. Ils ont démontré une corrélation forte entre la hauteur au garrot et la longueur des os longs quel que soit l'âge du poulain. Cela répond d'après eux, à la théorie de MAGNUSSON (1985) et de MCCANN *et al.* (1988) selon laquelle les chevaux sont proportionnels, c'est-à-dire que les chevaux les plus grands ont des os longs plus longs que les petits chevaux. Toutes les longueurs des os longs montrent une corrélation moyenne à forte entre elles quel que soit l'âge. Les longueurs de l'os métacarpien III, de l'os métatarsien III et des paturons antérieurs et postérieurs n'augmentent que de 5 à 7% entre le sevrage et l'âge de trois ans, confirmant que l'essentiel de la croissance des os longs de la partie distale des membres est terminée avant la première année. Ils suggèrent que l'on peut estimer la taille adulte du cheval avec la longueur de l'os métacarpien III. Les angles des boulets étaient significativement corrélés à l'angle de la face dorsale du sabot correspondant avec l'horizontale. L'inclinaison de l'épaule par rapport à l'horizontale, l'angle scapulo-huméral et l'angle radiométacarpien augmentent avec l'âge. De nombreuses mesures de la croissance (hauteur au garrot, hauteur de la croupe, longueurs de la scapula, de l'humérus, du radius et du fémur,...) augmentent entre 0 et 1 et entre de 1 et 2 ans, mais n'augmentent plus entre 2 et 3 ans, indiquant que la vitesse de croissance ralentit ou atteint un plateau à ce moment-là.

ANDERSON *et al.* (2004) ont étudié la relation entre la conformation et les problèmes locomoteurs chez le pur sang. Un genou en pied de banc contribue aux problèmes de boulet (OCD, épanchements,...). De longs paturons augmentent le risque de fractures des membres antérieurs. Un valgus du carpe pourrait servir de mécanisme protecteur, car le risque de fracture du carpe et le risque d'épanchement du carpe diminuent avec l'augmentation de l'angle du carpe dans le plan frontal.

3. Méthode apparentée aux méthodes photométriques

HUNT *et al.* (1999) ont mis au point une méthode apparentée à la méthode photométrique. Leur objectif était de pouvoir mesurer les poulains à partir de l'âge de

quelques jours. Cela implique de les contraindre à rester en position de référence, tout en les gardant détendus. Ils ont développé un box d'enregistrement pour le poulain qui permet de l'immobiliser tout en le laissant près de sa mère. Le box est conçu de manière à ce que la jument reste à proximité du poulain et garde un contact visuel avec lui pendant la mesure. Le box est constitué d'un fond blanc et de parois en plexiglas à travers desquels les images peuvent être enregistrées. Des mètres étalons qui permettront la calibration des images sont placés sur le côté et au sol, devant et au fond du box. Le poulain est pesé pendant l'enregistrement. Des caméras numériques sont préférées aux appareils photographiques. Une caméra fixe filme le poulain en vue latérale. Une caméra mobile le filme en vue de face en se déplaçant latéralement à travers un angle d'environ 10°. Elle donne un éventail de vue de face des membres. Les images les plus appropriées sont sélectionnées. Elles sont analysées dans un deuxième temps sur ordinateur. Sur les images sélectionnées, l'opérateur pointe les « cibles » avec la souris. Ces « cibles » comprennent les repères anatomiques sans marqueurs (hauteur au garrot, hauteur de la croupe...), les repères anatomiques avec marqueurs et les repères sur les toises qui permettront à l'ordinateur de calibrer les images.

Ces auteurs ont soulevé l'existence d'erreur de conversion des mesures et de distorsions de l'image. La conversion des mesures en unités physiques est erronée si le rapport hauteur/largeur des pixel est différent de 1, comme expliqué précédemment. Dans leur cas, le rapport était de 1,463 et les conversions ont été corrigées en conséquence. Il y a également une distorsion de l'image qui est produite par la lentille de la caméra. Les lignes droites de l'image sont pliées en bordure du champ de vision. Cette distorsion devait également exister dans les autres méthodes photométriques. Mais elle dépend de la lentille utilisée et les appareils étaient différents. Si dans cette étude, cette distorsion a nécessité une correction pouvant aller jusqu'à 2 cm en périphérie de l'image, il est impossible de dire que cette distorsion a été significative pour les méthodes photométriques. Ils ont également démontré que la hauteur de la caméra affecte significativement les dimensions calculées pour tous les paramètres. Ils ont donc laissé la caméra à hauteur fixe.

Ils n'ont pas évalué l'exactitude de leur méthode. Les mesures sont effectuées en deux dimensions et comme pour les méthodes photométriques, la projection des angles et

des longueurs a dû entraîner des erreurs géométriques. En revanche, ils ont évalué la précision de la méthode à chaque étape identifiable du protocole. La principale cause de variabilité des mesures était, comme pour les méthodes photométriques, la variations de la position du cheval et la déviation des marqueurs cutanés. En ce qui concerne l'analyse d'images sur ordinateur, ils ont évalué la variabilité du pointage des « cibles » avec la souris et elle s'est révélée très faible.

Si on ne connaît pas la justesse de cette méthode, sa fidélité après correction des déformations dues à la numérisation des images doit être du même ordre que celle des méthodes photométriques d'origine. Il faut noter que le pointage des « cibles » avec la souris entraîne très peu de variabilité. Cette méthode permet de mesurer les poulains, mais elle ne s'affranchit pas des principaux défauts des méthodes photométriques. Les mesures sont toujours effectuées en deux dimensions. La principale source de variabilité des résultats reste toujours la position du cheval et la déviation de la position des marqueurs. Enfin, elle nécessite également un temps incompressible de préparation du poulain lié au positionnement des marqueurs. De plus, le box de mesure n'est pas transportable.

Conclusion

Jusqu'à présent, les méthodes photométriques sont les seuls moyens d'évaluer de manière objective et quantitative la conformation du cheval sur des effectifs suffisamment grands pour être statistiquement valables. Or, ces méthodes présentent plusieurs inconvénients :

1. Les erreurs inhérentes aux opérateurs : Elles sont présentes quelle que soit la méthode utilisée, à chaque étape où un facteur humain intervient. Pour les méthodes photométriques, elles interviennent lors de la sélection de la position de référence du cheval, lors de la pose des marqueurs et lors des mesures manuelles sur les écrans de projection. Lorsque les images sont numérisées, les mesures des paramètres morphométriques sont effectuées par l'ordinateur. Les erreurs opérateur-dépendantes interviennent alors lors de la localisation du marqueurs sur les images avec la souris.

HUNT *et al.* (1999) ont démontré que cette erreur est négligeable. Informatiser les mesures des paramètres morphométriques diminue donc le risque d'erreurs inhérentes aux opérateurs.

2. Les erreurs inhérentes à la méthode : Elles constituent les inconvénients majeurs des méthodes photométriques.

- la variabilité de la position de référence du cheval (au placer) est la principale source de variabilité des résultats.
- la déviation de la position des marqueurs.
- les erreurs géométriques dues à la projection en 2-D des mesures sont un inconvénient majeur particulièrement dans la mesure des aplombs, car les rotations des membres sont fréquentes.
- les distorsions de l'image dues à la lentilles de l'appareil photographique ou de la caméra, qui sont plus importantes en périphérie de l'image, c'est-à-dire inégalement réparties sur l'image. Leur évaluation et leur correction sont difficiles.
- Les erreurs liées à la numérisation :
 - la compression et la résolution des images entraînent une diminution de leur précision,
 - la variation du rapport hauteur/largeur des pixels, qui peut être évaluée et corrigée.

3. Les considérations pratiques :

- Un temps de mesure encore long dû à la sélection de la position de référence du cheval et à la pose des marqueurs.
- La contrainte imposée au cheval de rester immobile en position de référence (au placer) rend complexe la mesure de poulains.

De plus, les méthodes présentées ont rarement été complètement évaluées. Les données disponibles sur la justesse et la fidélité des méthodes photométriques sont principalement données par MAGNUSSON (1985a). Il a effectué une étude préliminaire afin de mettre en place des réglages permettant d'atteindre une bonne précision. Cependant, par la suite ces réglages ont rarement été respectés.

Malgré les imperfections des méthodes utilisées, des relations conformation-performance et des relations conformation-longévité ont été démontrées. Les travaux doivent donc continuer et de nouvelles méthodes de mesure quantitative de la conformation plus efficaces doivent être développées. Le système idéal devra :

1. Pouvoir mesurer de grands effectifs :

- Rapidité des mesures sur le terrain, ce qui remet en cause la pose de marqueurs.
- Numérisation et informatisation des données.

2. Etre robuste :

- Peu sensible à la position du cheval elle-même (par rapport à la caméra ou à l'appareil photographique).
- S'affranchir du problème de la variabilité de la position du cheval au placer.
- S'affranchir du problème de la déviation des marqueurs.
- Pas ou peu sensible aux problèmes de distorsion et de déformation des images.
- Réalisable par des opérateurs différents.

3. Etre précis :

- Mesures en trois dimensions.
- Résolution spatiale élevée.
- Précision évaluée.

4. Etre pratique :

- Facilité de transport.
- Facilité et rapidité de mise en place sur le terrain.
- Contraintes pour le cheval limitées : mesure des poulains et des chevaux non dressés possible et réduction des risques.

C'est dans cette optique qu'une autre méthode de mesure des paramètres morphométriques innovante a été développée.

2^{ème} Partie :

Présentation de la méthode morphométrique en 3 dimensions

A partir de 1999, une méthode de mesure morphométrique dérivée des méthodes développées pour l'analyse cinématique de la locomotion du cheval a été développée au sein de l'UMR BPLC. Cette méthode a été présentée lors de la journée de la Recherche Equine 2002 (POURCELOT *et al.*, 2002), et sa validation expérimentale a fait l'objet d'un DEA (LACROIX, 1999). Cette méthode a pour particularités :

- d'être en 3 dimensions (3-D), ce qui permet des mesures conformes à la réalité,
- de ne pas requérir l'utilisation de marqueurs cutanés, ce qui permet un gain de temps considérable et permet ainsi de travailler sur de grands effectifs,
- d'avoir pour support des enregistrements vidéo du cheval au pas et non au placer. La position de référence du cheval au placer était la principale cause de variabilité des mesures dans les méthodes précédentes. De plus, enregistrer le cheval en mouvement facilite l'enregistrement des poulains à qui il est en général difficile d'imposer l'immobilité.

Depuis 2002, la méthode de morphométrie 3-D est appliquée dans le cadre du programme d'élevage du cheval Selle Français (SF), mené par l'ANSF et les Haras nationaux. L'UMR BPLC a ainsi mis sur pied 2 études à large échelle, précédées d'une étude « préliminaire » destinée à définir les paramètres morphométriques à étudier, et à valider l'utilisation de la méthode sur le terrain.

Ainsi, entre 2002 et 2006, les travaux suivants ont été effectués :

1. Dans le cadre de l'**étude préliminaire**, 20 chevaux de niveau international en CSO ont pu être comparés à 20 chevaux de classe D (CREVIER-DENOIX *et al.*, 2004).

2. Une population de 1430 chevaux SF de 4 et 5 ans ont été filmés lors des épreuves jeunes chevaux de 2002. Sept cent cinquante d'entre eux ont été sélectionnés (sur la base de leurs ascendants) et leurs enregistrements analysés. Cette base de données morphométriques a été complétée par celle issue d'une trentaine d'étalons SF (été 2003). Les résultats ont permis de déterminer l'**héritabilité d'une dizaine de traits morphologiques**.

3. Environ 115 poulains SF font actuellement l'objet d'un suivi longitudinal de l'évolution de la conformation, et en particulier des aplombs, avec la croissance. Des enregistrements ont déjà été effectués à 6 mois (en 2002 et 2003, pour chacune des 2 cohortes suivies) et à 18 mois (respectivement 2003 et 2004) et à 3 ans (2005). Ils ont été traités et sont en cours d'analyse. Mais la finalité de cette étude est de suivre la première cohorte, au moins sur le plan du devenir sportif et de l'intégrité de l'appareil locomoteur, au cours de leur carrière (à 6 et si possible à 9 ans, voire au-delà), de façon à pouvoir étudier les **relations entre la conformation** (dès l'âge de 6 mois) **et la longévité** sportive des sujets.

La méthode de mesure en 3-D comprend deux étapes principales. La première est l'enregistrement des chevaux sur le terrain. Les chevaux sont filmés, tenus en main et au pas, à l'aide de quatre caméras vidéo. La deuxième étape est le traitement des films en laboratoire. Deux séries de quatre images vidéo synchronisées sont sélectionnées. Elles correspondent à deux positions de référence du cheval, l'une pour le membre antérieur (images de référence antérieures = IR-Ant) et l'autre pour le membre postérieur (images de référence postérieures = IR-Post). Dans chaque série (pour chaque position de référence), les repères anatomiques sont relevés sur au moins deux des images, ce qui permet de mesurer les paramètres morphométriques en trois dimensions.

I. Enregistrements

A. Matériels

1. Caméras

On a utilisé des caméras numériques munies de la fonction de mise au point manuelle. Elles ont été utilisées en mode sport et LP (Long Play). Elles ont été branchées sur secteur. L'enregistrement est effectué sur des cassettes de 60 min. On a utilisé 4 caméras par enregistrement parmi deux caméras de modèle Canon MVX40, deux caméras de modèle Canon MV30 et deux caméras de modèle Panasonic NV-DS60.

2. Structure de calibration

C'est une structure parallélépipédique qui est placée au centre de la piste. Cette structure est munie de repères dont les coordonnées dans l'espace sont connues. Elle est filmée par les quatre caméras. Le relevé des repères sur les images vidéo fournit les données nécessaires aux calculs des coordonnées 3-D des repères anatomiques du cheval.

Dans le cadre du programme de morphométrie 3-D, 2 structures ont été utilisées successivement. Les enregistrements effectués en 2002 ont fait appel à une structure en p.v.c. de 3 m de long, 0,80 m de large et 2 m de haut (Fig. 3). Les repères étaient des marqueurs réfléchissants. Cette structure était trop flexible et elle avait tendance à se déformer avec le temps.

C'est pourquoi une autre structure a été utilisée à partir de 2003. Elle est en aluminium et fait 3 m de long, 1 m de large et 2 m de haut (Fig. 4). Elle est constituée de deux demi-socles, de quatre panneaux verticaux et de 18 tiges amovibles, ce qui permet de la monter et de la démonter facilement. Les intersections des tiges d'aluminium de la structure ont des coordonnées dans l'espace qui sont connues (Fig. 5).

Figure 3 : Structure de calibration utilisée en 2002. Cette structure est en p.v.c. Les marqueurs réfléchissants servent de repères dont le relevé fournit les données nécessaires aux calculs des coordonnées 3-D des repères anatomiques des chevaux.

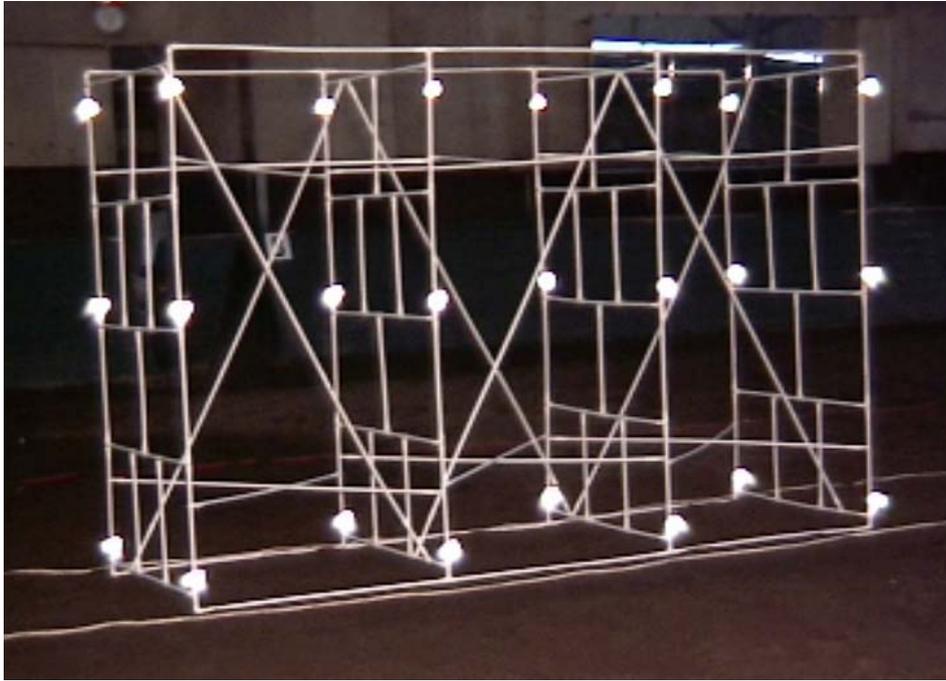


Figure 4 : Structure de calibration utilisée à partir de 2003. Elle est en aluminium. Les intersections des tiges d'aluminium servent de repères dont le relevé fournit les données nécessaires aux calculs des coordonnées 3-D des repères anatomiques des chevaux.

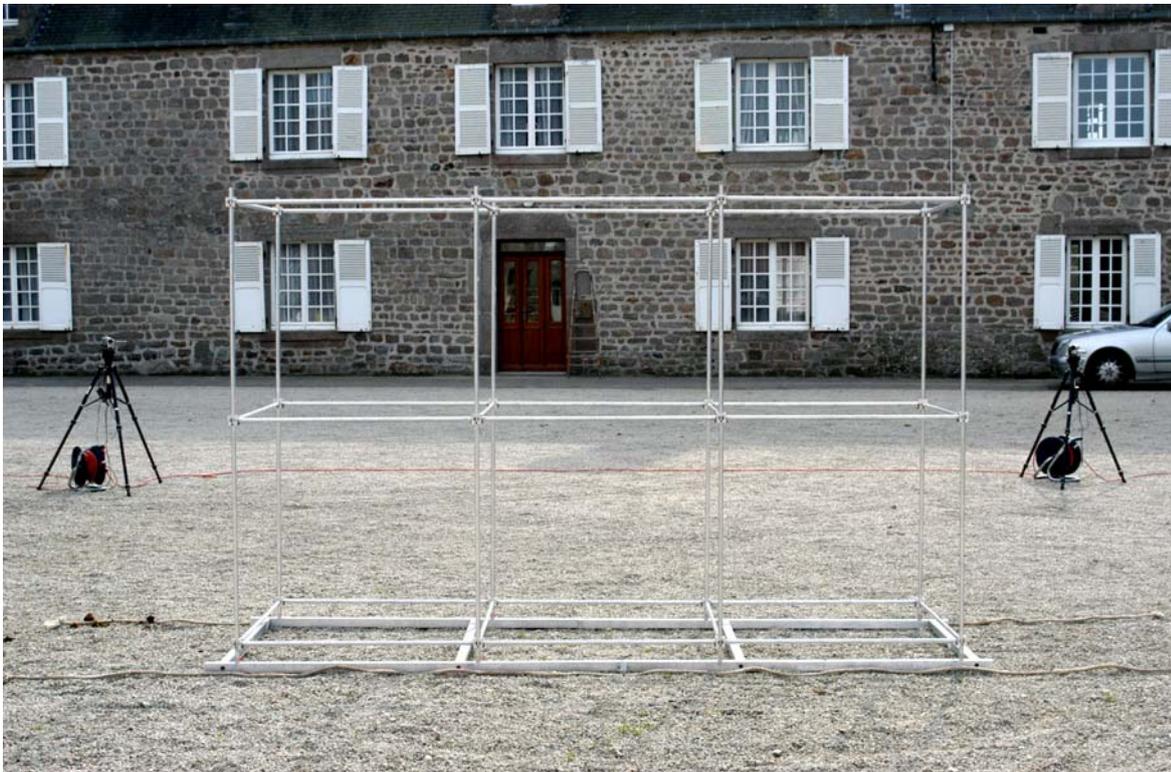
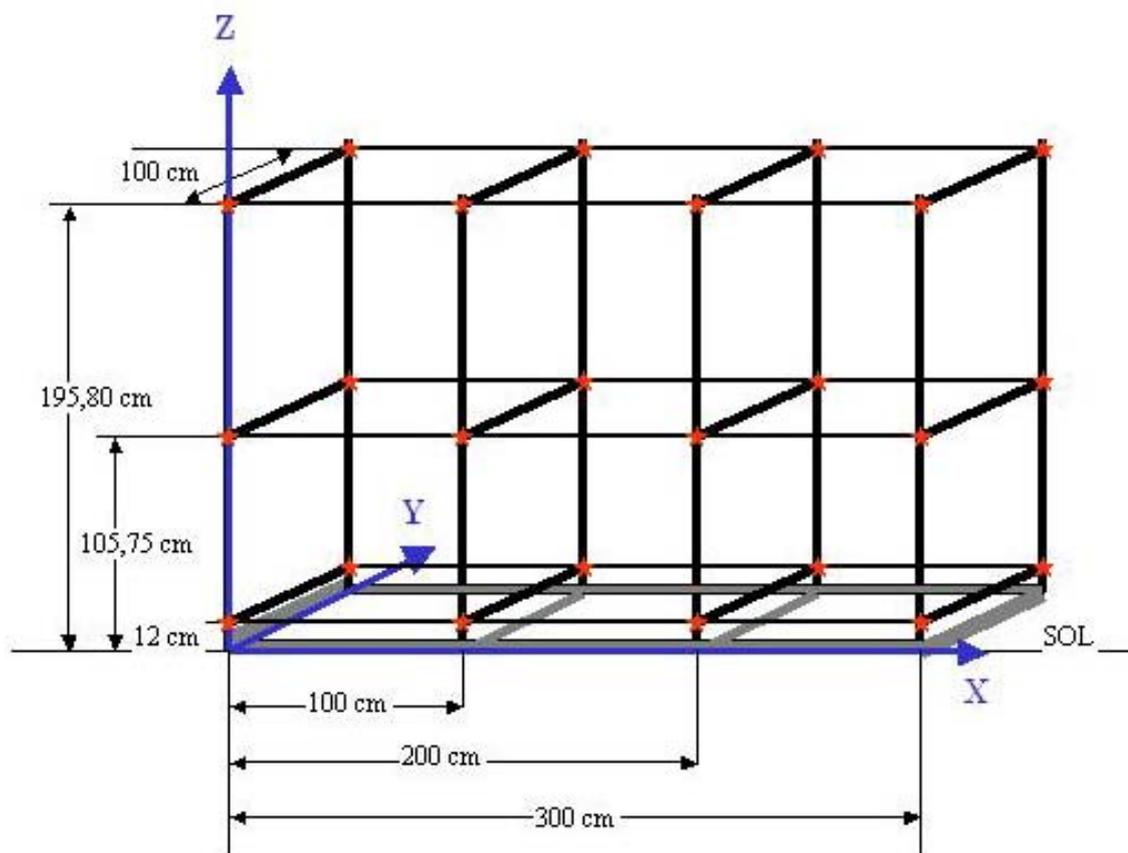


Figure 5 : Coordonnées connues de la structure de calibration utilisée depuis 2003.



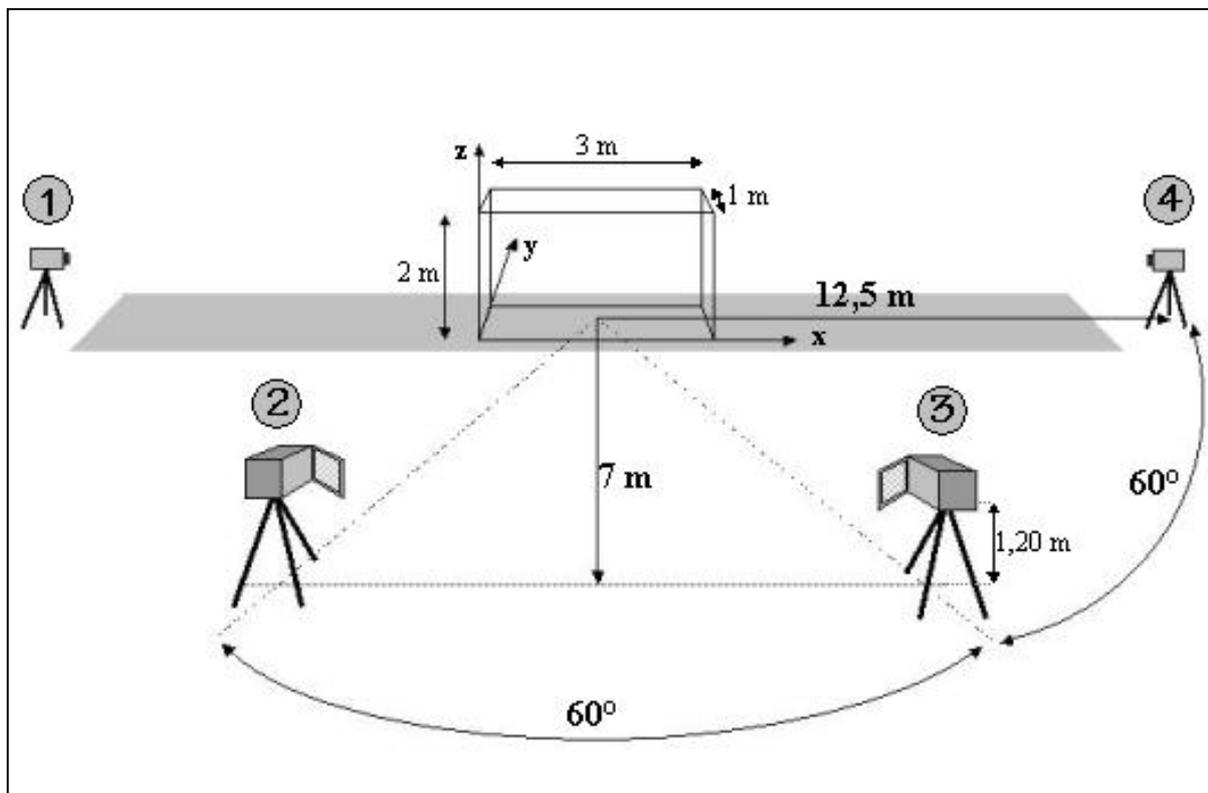
B. Protocole d'enregistrement

1. Préparation de l'enregistrement

L'enregistrement s'effectue sur une piste dure, régulière et plane (sol horizontal) d'environ 30 m de long. La structure de calibration est montée au centre de la piste. Des cordes sont placées contre chaque longueur de la structure afin de délimiter la zone d'enregistrement. Celle-ci fait environ 6 m de long et 1 m de large.

Les enregistrements sont effectués à l'aide de 4 caméras numériques fixées sur des pieds. Une caméra est placée à chaque extrémité de la piste, à 12,5 m minimum du centre de la structure, afin de filmer le cheval de face et de derrière. Les deux autres sont placées sur l'un des cotés de cette piste à 7 m du centre de la structure en faisant entre elles un angle de 60° (Fig. 6). Elles permettent de filmer le cheval de profil, sous deux angles différents.

Figure 6 : Disposition des caméras par rapport à la structure de calibration.



2. Enregistrement de la structure de calibration des caméras

La mise au point des caméras est ajustée au centre de la structure. On obtient ainsi des images nettes des chevaux lors de leur passage dans la zone d'enregistrement. La structure est filmée quelques secondes. Elle est ensuite retirée pour permettre le passage des chevaux. A la fin de la session d'enregistrement, elle est replacée au centre du champ et filmée de nouveau. Cela permet de disposer de deux calibrations des caméras, l'une de début et l'autre de fin, ce qui est nécessaire car il arrive que la position des caméras soit accidentellement modifiée au cours d'une session d'enregistrement.

3. Procédure d'enregistrement des chevaux

Les chevaux sont ensuite filmés un par un. Avant chaque cheval, un opérateur frappe du pied au sol dans le champ des caméras. Ce geste permet, a posteriori, de synchroniser les quatre caméras. Il est préférable que la queue du cheval soit nouée, excepté sur les plus jeunes poulains. Chaque cheval est ensuite filmé au pas, tenu en main, l'opérateur à gauche, lors de plusieurs allers et retours dans la zone d'enregistrement. L'objectif est d'obtenir des images où le cheval est calme, droit et au centre de la zone d'enregistrement.

II. Traitement et analyse des enregistrements

A. Matériels

L'ordinateur utilisé pour le traitement et l'analyse des enregistrements est un Macintosh muni d'une entrée Firewire et de deux écrans 19 pouces pour faciliter la manipulation et la visualisation des images.

Les enregistrements sont numérisés en laboratoire à l'aide du logiciel Adobe Première 6.0. Ensuite, le film est traité et analysé. Trois logiciels ont été spécifiquement développés par P.POURCELOT pour cette méthode. Le premier permet de traiter les films numériques, le second de calibrer les images, enfin le troisième de procéder aux mesures morphométriques.

B. Protocole de traitement et d'analyse des enregistrements

1. Synchronisation des quatre films

Les quatre films sont synchronisés avec un logiciel appelé Framesaver v 4.3β. Il ouvre les 4 films simultanément et permet de les faire défiler, image par image. Pour chaque film et avant chaque cheval, l'image correspondant au moment où le pied de l'opérateur touche le sol est sélectionné. Lorsque chaque film est arrêté sur cette image, les films sont synchronisés entre eux. Une fois synchronisés, les quatre films avancent et reculent simultanément.

2. Sélection des images de référence

Framesaver permet également d'enregistrer un ensemble de quatre images vidéo provenant des quatre films synchronisés. Les premiers jeux d'images enregistrés sont ceux qui correspondent à la structure de calibration de début et de fin de l'enregistrement. Ensuite, pour chaque cheval, on enregistre deux jeux d'images de référence (IR) : un pour le membre antérieur (IR-Ant) et l'autre pour le membre postérieur (IR-Post). Les quatre IR-Ant et les quatre IR-Post correspondent au moment où le canon du membre correspondant, antérieur d'une part et postérieur d'autre part, est vertical. Le sabot du membre au soutien doit être en regard du boulet du membre à l'appui sur les vues latérales (Fig. 7 et 8).

Comme le cheval effectue plusieurs allers-retours sur la piste d'enregistrement, on peut obtenir plusieurs IR-Ant et plusieurs IR-Post. Les meilleures images de référence parmi celles disponibles sont sélectionnées. Dans l'idéal, le cheval doit être droit et situé au centre de la piste. De plus, aucun objet ne doit gêner la localisation des repères anatomiques (queue, oreilles, crinière, opérateur qui tient le cheval en main, chien...)

Figure 7 : Images de référence du membre antérieur (IR-Ant). Elles proviennent de quatre films synchronisés. Elles correspondent approximativement au moment où le canon est vertical.



Figure 8 : Images de référence du membre postérieur (IR-Post). Elles proviennent de quatre films synchronisés. Elles correspondent approximativement au moment où le canon est vertical.



3. Relevé de la structure de calibration

Les quatre images synchronisées de la structure de calibration sont chargées avec le logiciel Calibrateur. Deux versions différentes de ce logiciel existent pour les deux structures. Calibrateur affiche sur les images des « squelettes » de la structure de calibration. Ils sont formés de carrés symbolisant les repères de la structure de calibration, reliés entre eux par des lignes (Fig. 9). Les repères de la structure de calibration sont alors pointés en positionnant chaque carré sur le repère correspondant. On obtient donc sur chacune des quatre images synchronisées un « squelette » superposé aux repères de la structure (Fig. 10). Les coordonnées 2D sont alors connues pour chacune des 4 images. La cohérence des relevés des coordonnées 2D effectués sur les quatre images peut être contrôlée à l'aide d'un paramètre mesurant l'erreur moyenne.

Ce logiciel utilise un algorithme mathématique appelé DLT (Direct Linear Transformation). Connaissant les coordonnées 3D de la structure et ses coordonnées 2D sur les images, cette méthode fournit un ensemble de paramètres mathématiques permettant le calcul des coordonnées 3-D d'un point dès que ce dernier a été relevé sur au moins deux images (POURCELOT *et al.*, 2000).

Figure 9 : Images de la structure de calibration chargées avec le logiciel Calibrateur. Ce logiciel affiche sur chaque image un « squelette » de structure composé de carrés. Le relevé de la structure de calibration s'effectue en pointant chaque carré sur le repère correspondant.

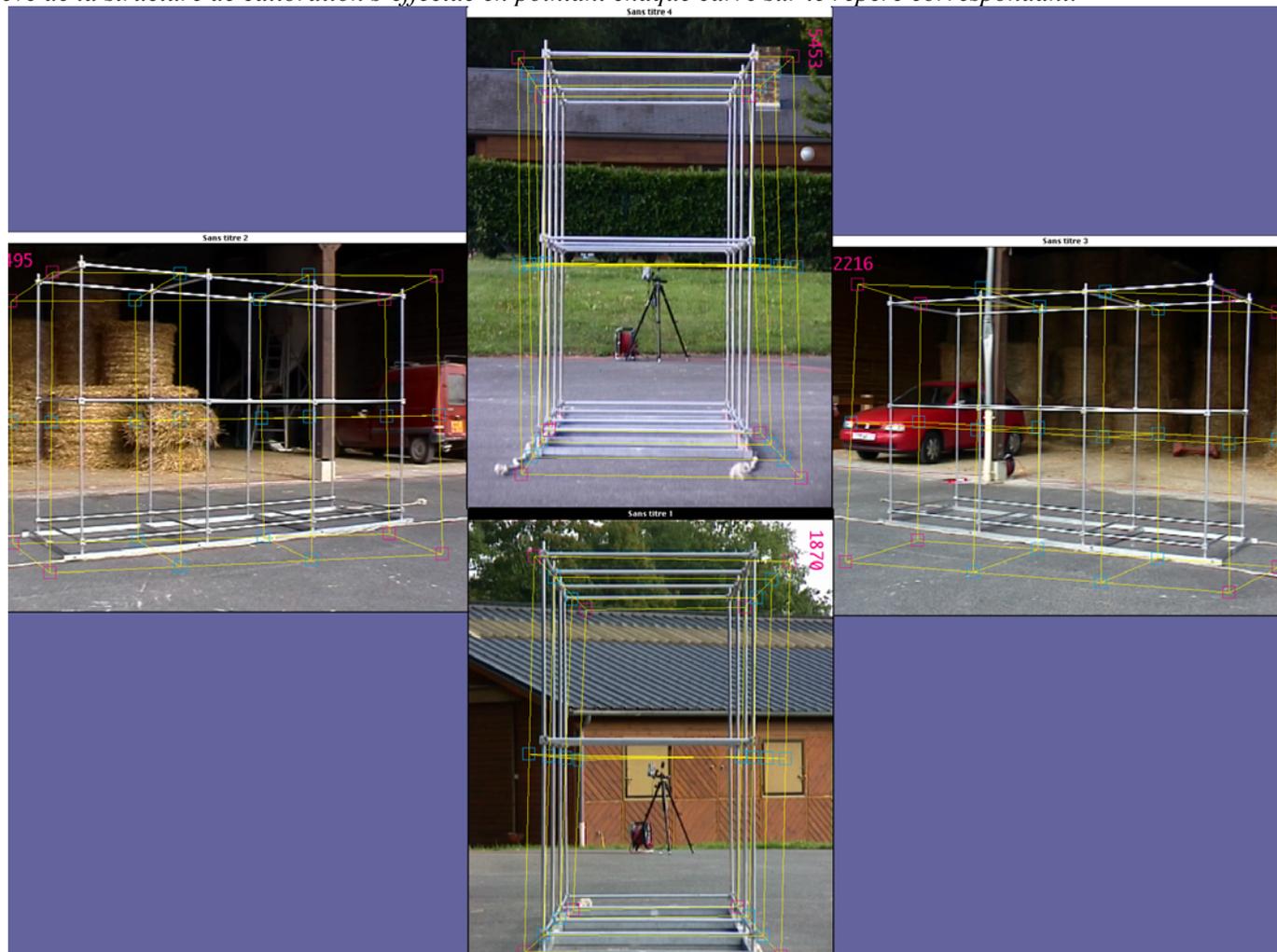
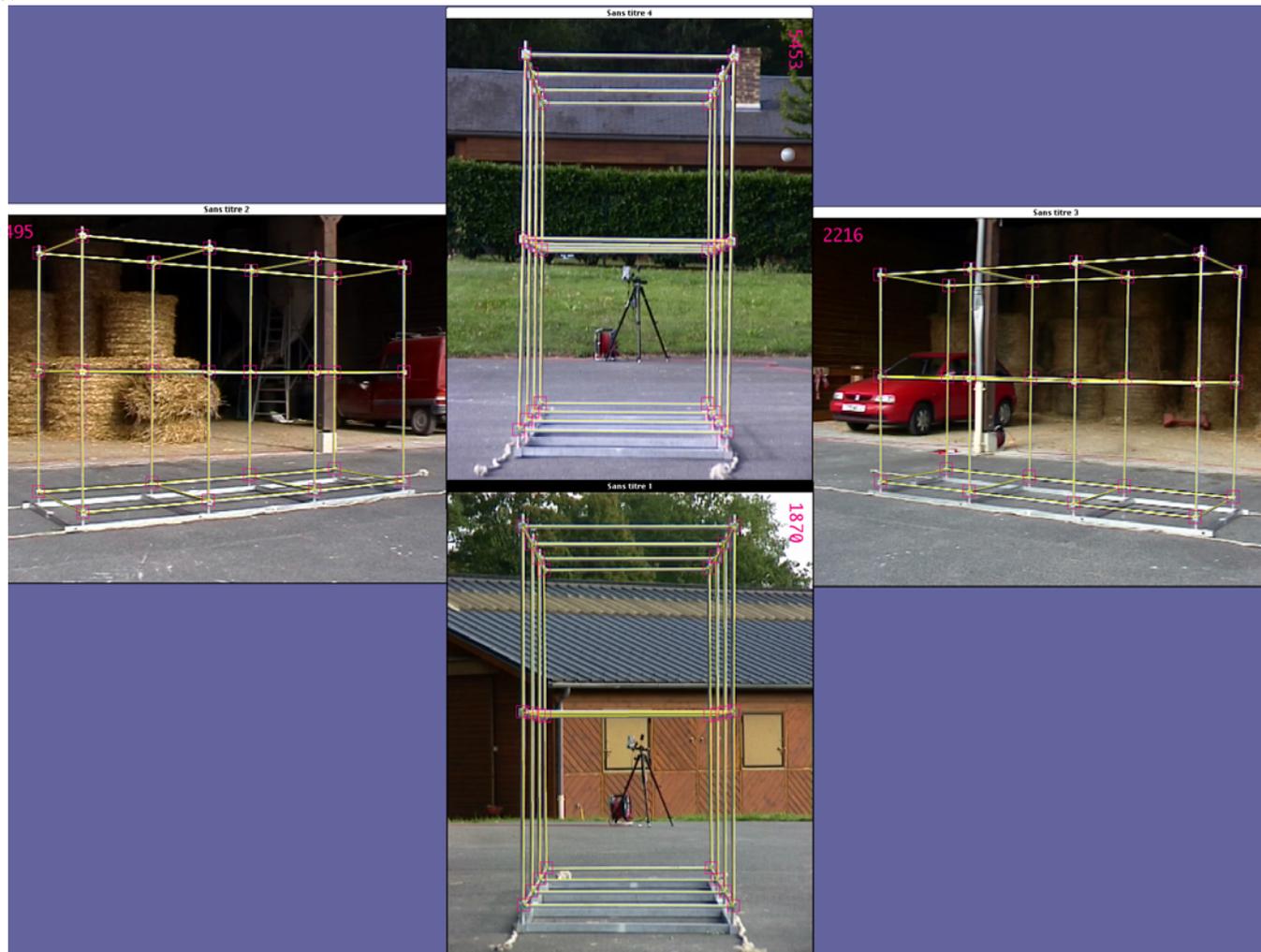


Figure 10 : Images de la structure de calibration relevée sous le logiciel Calibrateur. Chaque carré est positionné sur le repère. Le « squelette » de la structure est superposé à la structure.



4. Relevé des repères anatomiques

Le relevé des repères anatomiques s'effectue avec le logiciel Conformeur. Deux versions différentes de ce logiciel existent pour les deux structures. Pour chaque cheval les IR-Ant sont d'abord chargées. Elles sont ensuite calibrées grâce aux données fournies par Calibrateur. Conformeur affiche sur les images un « squelette » jaune (Fig. 11 et 12). Ce squelette est composé de carrés numérotés représentant les repères anatomiques qui vont être pointés et qui sont reliés entre eux par des lignes. On peut alors relever manuellement les repères anatomiques en plaçant chaque carré sur le repère anatomique correspondant au numéro (Fig. 13, 14, 15, 16 et 17). Le carré alors activé devient rouge. Les coordonnées 3D sont calculées à partir du moment où un repère est pointé sur au moins deux vues. Elles sont matérialisées sur l'image par un squelette bleu qui permet à tout moment de contrôler la cohérence des pointages effectués. Les coordonnées des repères anatomiques sont enregistrées sous format Excel. La même manipulation est effectuée pour les IR-Post . (Fig. 18 et 19)

Figure 11 : Images de référence du membre antérieur (IR-Ant) chargées avec le logiciel Conformeur. Ce logiciel affiche sur chaque image un « squelette » de cheval composé de carrés numérotés. Les carrés sont jaunes car ils n'ont pas encore été activés.



Figure 12 : Détail des images de référence du membre antérieur (IR-Ant) chargées avec le logiciel Conformeur : image de la caméra 3. Conformeur affiche sur chaque image un « squelette » de cheval composé de carrés numérotés. Les carrés sont jaunes car ils n'ont pas encore été activés.

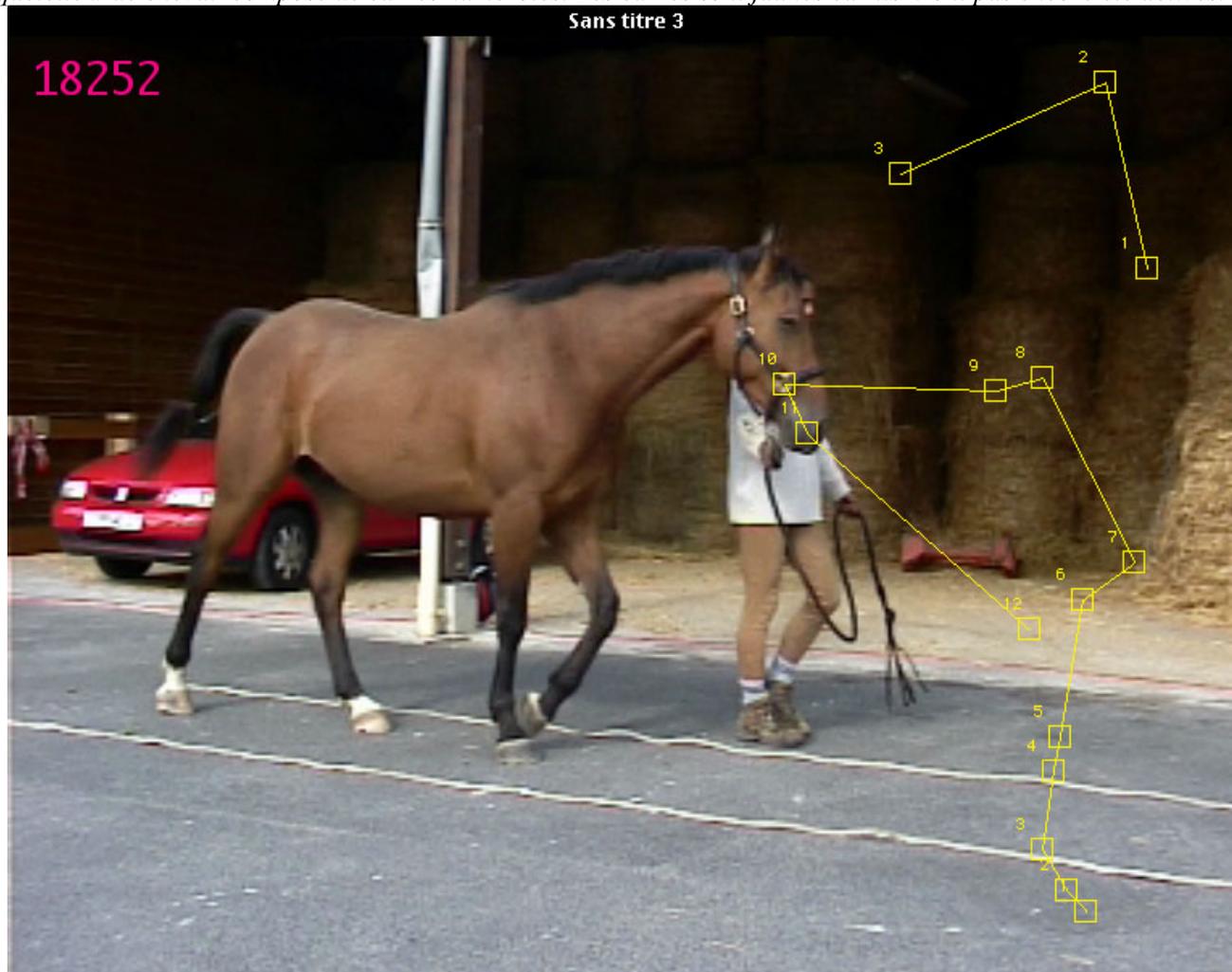


Figure 13 : Repères anatomiques des images de référence du membre antérieur (IR-Ant) et correspondance avec les numéros. Vue de profil (Dessin de J-M. Denoix).

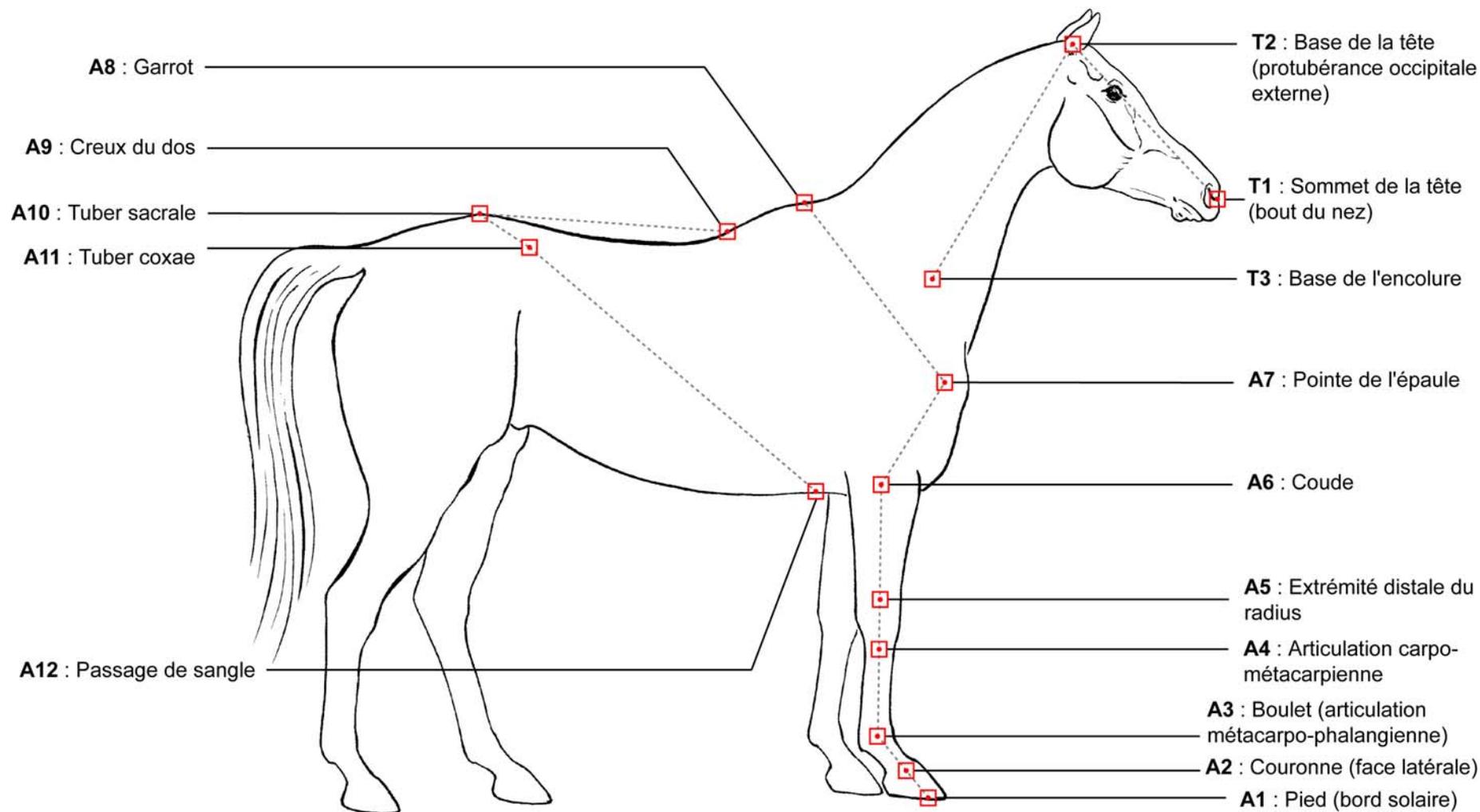


Figure 14 : Repères anatomiques des images de référence du membre antérieur (IR-Ant) et du membre postérieur (IR-Post) et correspondance avec les numéros. Vue de face et de derrière (Dessin de J-M. Denoix).

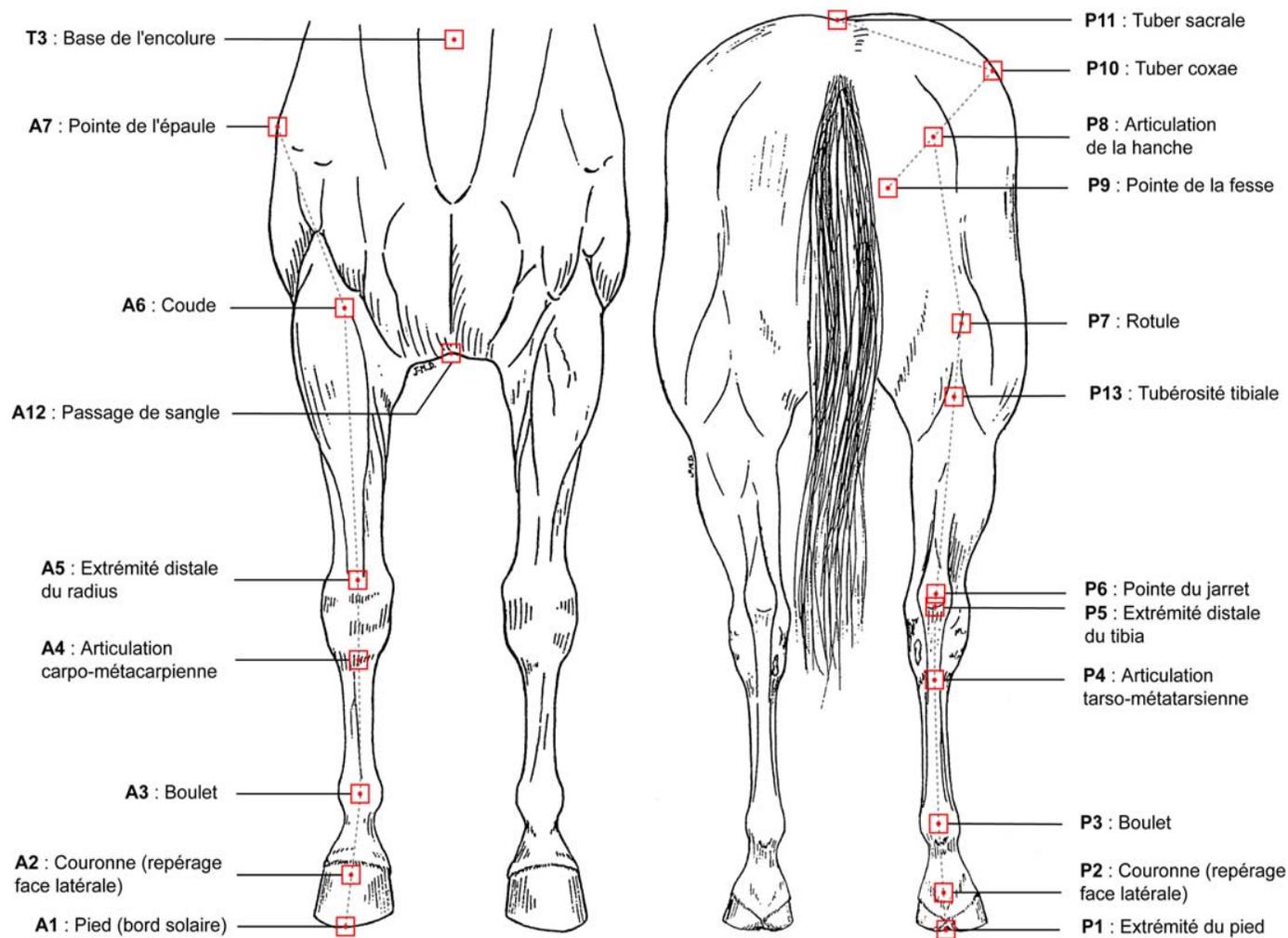


Figure 15 : Repères anatomiques de l'image de référence du membre postérieur (IR-Post) et correspondance avec les numéros. Vue de profil (Dessin de J-M. Denoix).

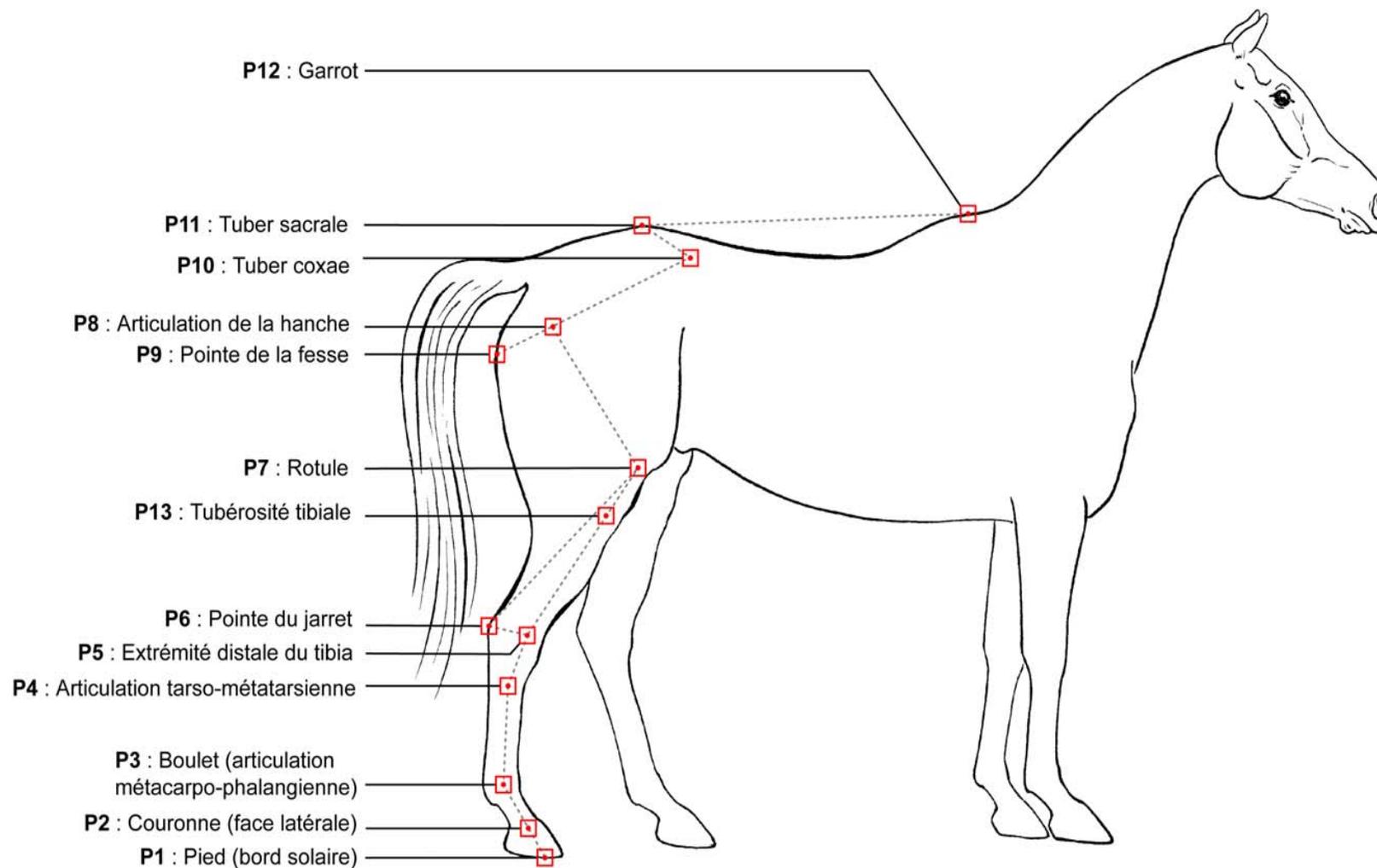


Figure 16 : Images de référence du membre antérieur (IR-Ant) chargées avec le logiciel Conformeur. Chaque carré numéroté est positionné sur le repère anatomique correspondant.



Figure 17 : Détail des images référence du membre antérieur (IR-Ant) chargées avec le logiciel Conformeur : détail de l'image de la caméra 3. Chaque carré numéroté est positionné sur le repère anatomique correspondant. Chaque carré devient rose quand il est pointé sur un repère. Les carrés bleus, ici superposés aux roses, matérialisent les coordonnées 3-D calculées à partir des autres vues.

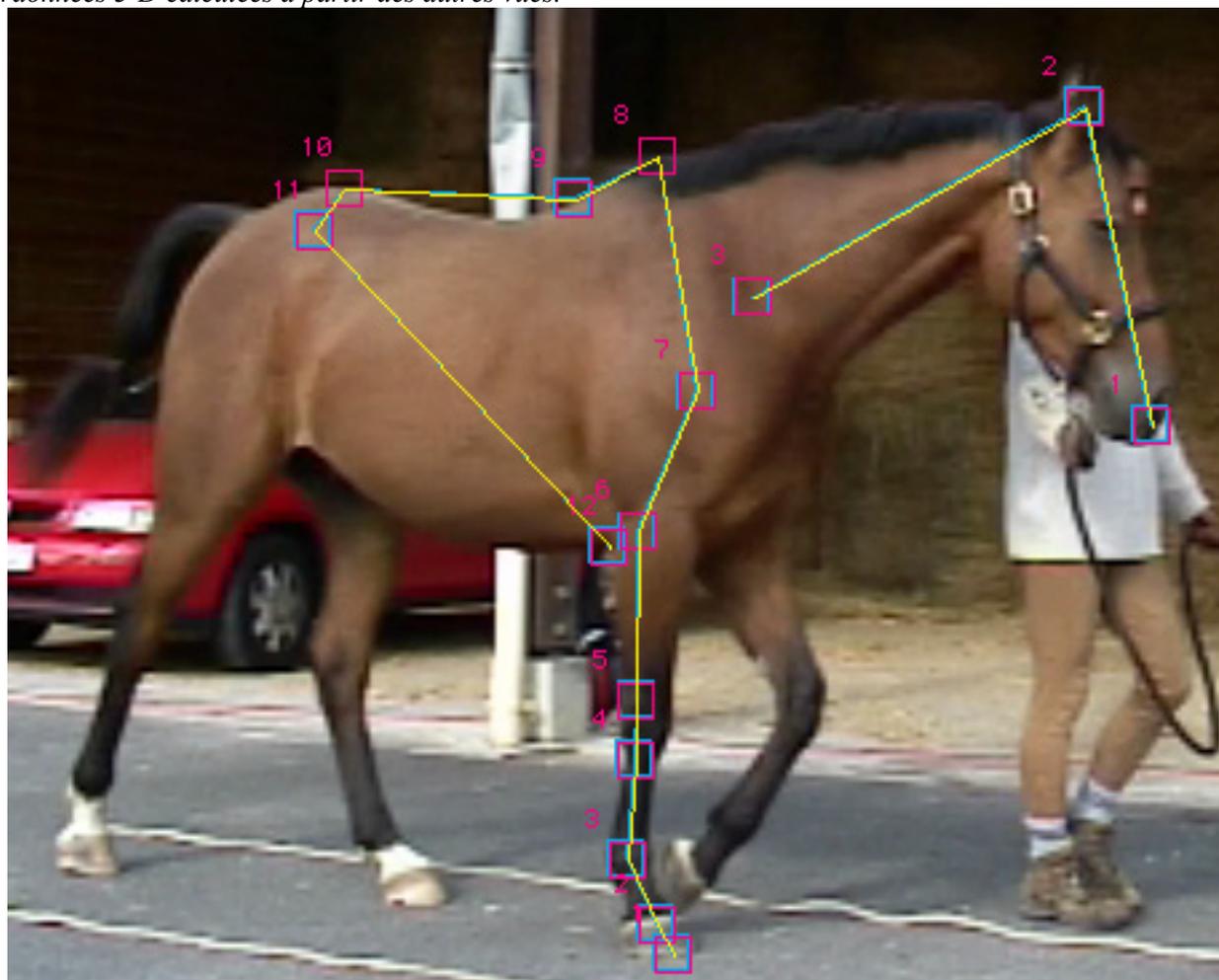


Figure 18 : Images de référence du membre postérieur (IR-Post) chargées avec le logiciel Conformeur. Chaque carré numéroté est positionné sur le repère anatomique correspondant.



Figure 19 : Détail des images référence du membre postérieur (IR-Post) chargées avec le logiciel Conformeur : détail de l'image de la caméra 3. Chaque carré numéroté est positionné sur le repère anatomique correspondant. Chaque carré devient rose quand il est pointé sur un repère. Les carrés bleus, ici superposés aux roses, matérialisent les coordonnées 3-D calculées à partir des autres vues.



5. Calcul des paramètres morphométriques

Conformeur calcule de manière automatique 374 paramètres morphométriques à partir des coordonnées des repères anatomiques. Les résultats sont enregistrés sous format Excel. Ces paramètres correspondent à :

- des mesures « directes » : hauteurs (altitude) de certains repères anatomiques, longueurs des différents segments et bras de leviers, largeurs de certaines régions, angles articulaires, angles de certains segments par rapport à l'horizontale, orientations des rayons osseux des membres par rapport à la verticale (tous ces angles sont des angles réels c'est-à-dire calculés en 3-D).
- des mesures « indirectes », dérivées des précédentes : hauteurs, longueurs et largeurs rapportées à la hauteur au garrot, ou à d'autres mesures directes (ex : longueur de l'avant-bras / longueur du canon antérieur), angles articulaires projetés dans le plan sagittal et frontal (correspondant à l'évaluation des aplombs de profil, de devant et de derrière).

III. Discussion

A. Enregistrements sur le terrain

Il est important de nouer la queue sur les poulains de 3 ans et si possible de 18 mois. En effet, une queue qui n'est pas nouée cache souvent le jarret sur la vue de derrière des images de référence du postérieur et gêne le relevé des repères anatomiques de cette région.

Les caméras doivent être fermement fixées sur leurs pieds afin d'éviter qu'elles ne bougent. Pour la même raison, les pieds des caméras doivent être posés sur un sol dur et stable et bien vissés une fois réglés. Une fois que les caméras sont installées et qu'elles enregistrent la structure de calibration, il est impératif de ne plus les toucher. Si un événement quelconque susceptible d'avoir fait bouger les caméras se produit, il doit être noté sur le compte rendu afin de faciliter le traitement des images, et de les recalibrées.

Utiliser les caméras en mode LP permet d'augmenter le temps d'enregistrement de 30 minutes sans altérer la qualité de l'image. Le mode sport permet de limiter le flou cinétique en augmentant la vitesse d'obturation. Les images obtenues sont ainsi plus nettes. En contrepartie, elles sont légèrement sous-exposées. La luminosité doit donc être suffisamment importante pour obtenir des images de bonne qualité.

Les enregistrements des 6 et 18 mois ont été faits en automne et ceux des 3 ans en fin d'été. La luminosité naturelle est donc souvent réduite. C'est pourquoi il est important d'éviter d'enregistrer les chevaux en début ou fin de journée. De plus, il est impératif, dans la mesure des possibilités sur le terrain, d'éviter de positionner les caméras à contre-jour. Un endroit sans zone d'ombre est préférable. Pour les 3 ans, dans les cas de manque de luminosité naturelle, deux projecteurs de 1000 watts branchés sur un groupe électrogène ont été utilisés.

B. Traitement et analyse des enregistrements

1. Synchronisation

La synchronisation est effectuée en sélectionnant les 4 images (une par caméra) correspondant à un même évènement. Elles doivent être les plus proches les unes des autres dans les temps. L'enregistrement s'effectue à 25 images par seconde. Il y a donc 4 centièmes de seconde entre chaque image. La synchronisation est donc effectuée à plus ou moins deux centièmes de seconde près. Dans certains cas, il peut exister entre les images synchronisées une différence sensible de la position du cheval sans qu'une resynchronisation ne l'améliore.

De plus, la fréquence d'acquisition des images est réglée par l'horloge à quartz de la caméra. Il existe des variations minimales de la fréquence de vibration entre les quartz qui implique une désynchronisation minimale des caméras au cours du temps. Il est alors quelques fois nécessaire de resynchroniser les caméras. Pour cette raison, le geste de synchronisation a été fait avant le passage de chaque cheval. La synchronisation des caméras a donc pu être vérifiée avant chaque cheval.

Deux protocoles d'enregistrement alternatifs permettraient de synchroniser les caméras entre elles de manière exacte lors de l'enregistrement. Ils éviteraient une

approximation lors de la synchronisation des caméras et leur désynchronisation entre elles au cours du temps.

a) Systeme du « genlock »

Ce système fonctionne avec quatre caméras que l'on peut synchroniser de manière exacte. Elles sont reliées entre elles par un câble. Une caméra est déclarée maître. Les trois autres démarrent l'enregistrement au même moment que la caméra maître. Elles utilisent également l'horloge de la caméra maître. Ce système nécessite également une digitalisation des films et la résolution des images seraient du même ordre que celle des caméras de cette étude. La mise en place sur le terrain n'est pas plus complexe que pour cette étude. Mais ces caméras sont 20 fois plus chères que celles utilisées dans cette étude (POURCELOT *et al.* 2000). L'investissement financier est trop important en regard des bénéfices apportés.

b) L'enregistrement directement sur un ordinateur

Ce protocole implique la présence d'un ordinateur lors de l'enregistrement. Les caméras ne sont munies que de la partie optique et du capteur CCD. Elles sont reliées à l'ordinateur qui enregistre en temps réel les quatre films. La synchronisation des quatre enregistrements est effectuée par l'ordinateur. Ce système permettrait également d'augmenter la résolution de l'image. De plus, l'enregistrement étant effectué directement sur l'ordinateur, les films n'ont plus besoin d'être digitalisés.

Ce protocole peut être amélioré en utilisant des caméras qui enregistrent à une fréquence supérieure à 25 images par seconde. Cela permet d'obtenir une sélection des images de référence plus précise sur la position du cheval. Cette amélioration est impossible avec le protocole d'enregistrement utilisé dans cette étude car la fréquence d'acquisition d'image de 25 images par seconde est caractéristique du format vidéo et sortir du format vidéo implique que les films obtenus ne peuvent pas être lus avec les équipements vidéo classiques (magnétoscope, télévision, moniteur,...). Mais dans ce système, comme l'enregistrement s'effectue directement sur l'ordinateur, sortir du format vidéo est possible à condition d'avoir programmé préalablement l'ordinateur.

Ce protocole nécessite de concevoir un logiciel et un système de transport pour l'ordinateur. De plus, la complexité de mise en place de ce protocole sur le terrain en

limiterait son caractère « tout terrain ». Il nécessite un investissement financier supérieur à celui du protocole utilisé dans cette étude. En effet, outre le prix de l'ordinateur, les caméras dont la fréquence d'acquisition est supérieure au format vidéo coûteraient environ trois fois plus chères que les caméras utilisées dans cette étude. Cependant l'investissement financier reste abordable au regard des bénéfices apportés et l'utilisation de ce protocole d'enregistrement est envisagée dans l'avenir. Mais il est nécessaire de mettre au point et d'améliorer ses conditions pratiques de mise en place (transport, facilité de montage et de démontage, facilité d'utilisation, programmation...).

2. Calibration

Lorsqu'une caméra bouge au cours de l'enregistrement, il y a un décalage entre l'image de calibration de cette caméra et l'image de référence du cheval (Fig. 20). Il y a donc un décalage entre les coordonnées calculées et les coordonnées réelles des repères anatomiques. Un décalage d'un ou deux pixels suffit pour être gênant et cela correspond à un mouvement très faible de la caméra. Cela n'est pas rare, malgré toutes les précautions prises lors de l'enregistrement. Ce problème peut être résolu par le choix de la calibration (calibration de début ou calibration de fin), dans le cas d'un mouvement ponctuel et unique de la caméra. Mais lorsque la caméra bouge continuellement ou plusieurs fois, une correction de la calibration est nécessaire.

Le logiciel Conformeur permet de corriger la calibration par une translation horizontale et/ou verticale des coordonnées de la structure sur l'image correspondant à la caméra modifiée. Il recalcule alors les paramètres de la DLT de la caméra modifiée puis les coordonnées 3-D des repères anatomiques.

Figure 20 : Exemple de décalage vertical important entre l'image de calibration (à gauche) et l'image de référence (à gauche).



L'évaluation du nombre de pixels de la modification ne peut se faire que par comparaison de l'image de calibration et de l'image de référence en les superposant comme sur la figure 20. Cette évaluation est donc subjective. Elle nécessite d'avoir des repères comparables sur les bords de l'image, ce qui n'est pas toujours le cas. De plus, comme la correction ne s'effectue pas sur les images, il est impossible de vérifier objectivement que la modification soit du bon nombre de pixels. Enfin, la correction d'une rotation de la caméra uniquement par des translations est -par définition- incomplète.

Plusieurs améliorations sont envisagées pour la fonction de correction de la calibration de Conformeur. La première est de répercuter la modification sur l'image de calibration. Sur la figure 20 l'image de calibration (à gauche) serait décalée vers le bas après correction, ce qui permettrait de vérifier l'exactitude de la modification par comparaison des deux images. La deuxième amélioration permet de superposer les deux images par transparence. Sur la figure 20, on verrait l'intégralité de l'image de la calibration à travers l'image de référence. Cela serait intéressant surtout pour les cas où il n'y a pas de repère en périphérie de l'image. Enfin, une possibilité de rotation dans la correction sera introduite.

3. Relevés des repères anatomiques

a- Qualité du relevé des repères anatomiques

De la qualité du relevé des repères anatomiques dépendra la justesse des paramètres morphométriques calculés. Plusieurs facteurs interviennent d'abord dans la qualité générale du relevé puis dans la qualité du relevé de chaque repère anatomique.

1-Qualité générale du relevé

La qualité générale du relevé des repères anatomiques dépend de plusieurs facteurs :

- L'application et l'expérience de l'opérateur : Elles permettent d'obtenir des relevés de bonne qualité malgré les problèmes que l'on peut rencontrer sur les images. Elles permettent également de limiter la dérive de la localisation des repères qui arrive lorsqu'un grand effectif de chevaux est étudié. Néanmoins, elles ne permettent pas, à mon avis, de se passer d'une relecture des relevés au minimum. Le regard extérieur d'un autre opérateur expérimenté peut permettre d'identifier les dérives et de résoudre les difficultés rencontrées.

- La qualité de l'image : Un bon éclairage et un bon contraste entre le cheval et le fond facilitent énormément le relevé.
- La position du cheval : obtenir un cheval droit et dans l'axe de la piste sur les images facilite le relevé. Un relevé de bonne qualité est tout à fait possible avec une position imparfaite du cheval, mais demande plus de temps, d'application et d'expérience de la part de l'opérateur.
- Les étapes précédentes de traitement des films et des images :
 - La synchronisation : un défaut minime de la synchronisation gênera le relevé des repères anatomiques sur les parties qui se déplacent le plus rapidement au pas, et pour lesquels une désynchronisation minime sera visible. Cela concerne notamment la partie la plus distale des membres, la tête et la ligne du dos.
 - La sélection des images de référence : la sélection ne peut s'effectuer que parmi les images disponibles. La quantité d'images disponibles dépend du nombre d'allers-retours du cheval lors de l'enregistrement. L'opérateur responsable de l'enregistrement décide de la fin de l'enregistrement d'un cheval lorsqu'il estime que les images obtenues suffiront au relevé. Il est à mon avis nécessaire que cet opérateur ait une expérience du relevé. De même, le choix des meilleures images de référence parmi celles disponibles doit se faire par un opérateur qui a déjà relevé des images.
 - La calibration : souvent l'erreur de calibration provient d'un mouvement minime de la caméra. L'ordre de grandeur de ces erreurs est alors de quelques pixels. Elles sont de ce fait difficilement repérées, identifiées et elles prennent énormément de temps à être corrigées, quelques fois de manière incomplète (cf. précédemment). Le problème est amplifié lorsque plusieurs caméras ont bougé. L'identification de l'erreur et la qualité de la correction dépend de l'application et de l'expérience de l'opérateur lors du relevé.

2-Repères anatomiques

La qualité du relevé de chaque repère anatomique dépend également des caractéristiques propres du repère, notamment de sa localisation et de sa visibilité.

○ Repères anatomiques de la tête et de l'encolure

La tête est souvent bien éclairée. La localisation des repères du sommet (T1) et de la base (T2) de la tête n'est pas gênée par les muscles ou la graisse. Il arrive, souvent chez les poulains, que la tête du cheval ne soit pas dans l'axe. Cela complique notamment la localisation de T1. Les oreilles et la crinière peuvent également gêner la localisation de T1 et T2. Ces difficultés augmentent certainement le temps du relevé, mais elles ne me semblent pas, en général, diminuer sa qualité. Le repère de « la base de l'encolure » (T3) a une localisation définie par convention de manière à être en regard de la colonne vertébrale malgré la présence des muscles de l'encolure qui la masquent totalement. Les seules difficultés de sa localisation est de maîtriser la norme et de ne pas la faire dévier au cours des relevés.

○ Repères anatomiques de la partie distale des membres

Le relevé de ces repères anatomiques permet de calculer des paramètres morphométriques importants, notamment les angles qui correspondent aux aplombs. Non seulement les aplombs sont considérés comme l'un des facteurs les plus importants de la conformation du cheval, mais leur mesure en angles réels (en 3-D) est l'un des principaux intérêts de cette méthode.

Un soin tout particulier doit donc être porté à la localisation de ces repères. Dans ces régions, leur localisation n'est pas gênée par les muscles ou la graisse. Mais lors d'éclairage uniquement naturel, comme c'est le cas dans la majorité des enregistrements, les parties distales des membres sont souvent moins bien éclairées. De plus, la robe du cheval y est souvent plus foncée et les autres membres peuvent gêner la localisation des repères en se confondant sur l'image avec le membre mesuré. (Fig. 21). D'autres difficultés peuvent intervenir comme une désynchronisation minimale qui est la plus gênante pour la localisation des repères du doigt et la queue du cheval qui peut cacher des repères (souvent la pointe du jarret). Un défaut de calibration se remarque souvent lors du relevé des repères anatomiques

des membres distaux. Les régions sont petites, et des localisations aberrantes des coordonnées 3-D calculées sont plus facilement repérables.

Figure 21 : Illustration d'un exemple de difficultés de localisation des repères anatomiques de la partie distale du membre. On voit ici une image de référence antérieure (caméra de face). Le membre qui devra être relevé est l'antérieur droit du cheval (à gauche sur l'image). Au niveau du carpe (entouré en blanc), on remarque que la robe est foncée et que la limite entre l'antérieur droit et le postérieur droit est difficilement identifiable. Or les conditions d'éclairage sont très bonnes.



- Repères anatomiques de la partie proximale des membres

Les repères anatomiques sont choisis de manière à ce qu'ils soient facilement visibles sur le cheval. Cependant, la présence de muscles ou de graisse peut gêner leur localisation, surtout chez les chevaux adultes. C'est souvent le cas pour le coude. Il n'est directement visible que sur les vues latérales. Or sur ces vues, le muscle triceps brachial cache souvent le ligament collatéral latéral, défini en premier lieu comme le repère anatomique du coude. J'ai choisi de prendre un autre repère : la tubérosité d'insertion du ligament collatéral latéral sur le radius qui est un peu plus distale mais souvent plus visible. La présence de muscles ou de graisse gêne quelque fois la localisation de la pointe de l'épaule surtout sur la vue de face. De plus, pour ce repère une cohérence des relevés sur les deux vues latérales en x et en z peut être difficile à obtenir. La présence de muscles gêne également la localisation de la pointe des fesses sur la vue de derrière. La rotule est elle toujours cachée dans la graisse du grasset, mais reste localisable au niveau de l'insertion du quadriceps fémoral. La tubérosité tibiale n'est directement visible que sur les vues latérales. Elle est souvent délicate à localiser. Enfin, le tuber coxae est particulièrement peu visible sur les vues latérales. Il est caché sur la vue de derrière par les muscles de la croupe. Il doit donc être repérable sur la vue de face. Il faut éviter, lors de la sélection des images de référence, que la tête ou le corps du cheval ne cachent ce repère.

- Repères anatomiques du dos

Leurs localisations sont facilitées par un contraste marqué entre la robe du cheval et le fond. Le Tuber sacrale est bien visible sur la vue de derrière, mais sur les vues latérales, il peut être difficile à localiser précisément en x lorsque la croupe est plate. Sur les poulains qui ont un garrot pas encore complètement formé, le garrot peut également être difficile à localiser en x. Le garrot n'est pas directement visible sur les vues de face, et sa position en y doit être déterminée sur une ligne verticale passant à égale distance des deux pointes des épaules. Le repère du creux du dos n'est visible que sur les vues latérales. Sa localisation est définie par convention et correspond au point d'inflexion de la ligne du dos. Ce point n'est pas toujours facile à localiser et sa cohérence entre les deux vues latérales est souvent difficile à obtenir.

○ Le passage de sangle

Les mesures de circonférence sont exclues ici car la méthode de morphométrie 3-D est conçue pour mesurer un grand nombre de chevaux rapidement. Il est donc impossible de mesurer la circonférence du thorax, par exemple à l'aide d'un ruban. Le repère du passage de sangle permet d'obtenir néanmoins des paramètres morphométriques sur le thorax. La localisation de ce point est défini par convention et relativement facile à identifier.

b- Améliorations envisageables

Le relevé des repères anatomiques est l'étape qui nécessite le plus de temps. Il faut en moyenne 1 à 1,5 minute(s) par repère d'après CREVIER-DENOIX *et al.* (2005). Or il y a 28 repères anatomiques par cheval. D'après mon expérience, il faut compter environ une heure par cheval lors du premier relevé et au minimum 30 min lors d'une relecture. Ces temps sont évalués alors que les enregistrements et le traitement des films et des images ont été effectuées par et/ou avec des opérateurs expérimentés. Le relevé sur des images très difficiles ou par un opérateur inexpérimenté peut prendre deux fois plus de temps.

Plusieurs solutions permettraient de diminuer la longueur de cette étape et, de fait, le risque d'erreurs et de déviations des relevés. La première consiste en une sélection des repères anatomiques en fonction à la fois de leur pertinence par rapport au sujet de l'étude et de leur facilité/rapidité de relevé. Cette sélection n'est pas toujours possible. La deuxième passerait par une facilitation des relevés. Plusieurs améliorations peuvent alors être envisagées. Premièrement, le tuber coxae s'est révélé peu visible sur les images de référence. Le relevé de ce repère a pris beaucoup plus de temps que celui des autres repères. Il est donc envisagé de mettre en place un marqueur cutané pour ce repère lors des prochains enregistrements. Deuxièmement dans certains cas, le repère n'est pas directement visible sur certaines vues et nécessite pourtant d'y être localisé, par exemple le garrot. Il est bien visible sur les vues latérales (localisation en x et en z), mais caché par la tête et l'encolure sur la vue de face. Or il est nécessaire de le localiser en y, ce que seul la vue de face, et quelques fois la vue de derrière, permettent. Sur la vue de face, le vertex doit donc être recentré sur une ligne passant perpendiculairement et au milieu de l'axe reliant les deux pointes des épaules. L'introduction d'une fonction de dessin et de mesure sur les images de référence accélérerait le relevé et améliorerait sa précision. Cela serait relativement facile à mettre en place.

Conclusion

Le protocole de mesure morphométrique en 3-D comprend deux étapes principales :

- L'enregistrement des chevaux sur le terrain : quatre caméras sont disposées aux extrémités et sur un côté d'une piste, en formant entre elles un angle de 60°. Une structure de calibration, placée au centre de la piste, est filmée avant et après l'enregistrement des chevaux. Les chevaux sont filmés au pas, tenus en main, sur la piste. Cette méthode ne nécessite pas la pose de marqueurs cutanés.

- Le traitement et l'analyse des enregistrements en laboratoire : ils consistent d'abord à numériser et à synchroniser les films ; les images de référence sont ensuite sélectionnées puis traitées (relevé des repères anatomiques). Le relevé des points de référence de la structure de calibration permet le calcul des paramètres mathématiques qui sont utilisés pour calculer les coordonnées en 3-D des repères anatomiques relevés par l'opérateur. C'est à partir de ces coordonnées que les paramètres morphométriques sont calculés de façon automatique.

Cette méthode originale a pour particularité de fournir des mesures en 3-D. Sur le terrain, l'enregistrement des chevaux avec cette méthode est facile. En effet, le fait de ne pas requérir la pose de marqueurs cutanés permet de gagner du temps lors des enregistrements et de pouvoir ainsi enregistrer un grand nombre de chevaux. Le matériel est abordable financièrement, facile à transporter et à mettre en place sur le terrain. En laboratoire, le traitement et l'analyse des enregistrements sont en revanche longs et fastidieux. Cette étape peut être améliorée mais le relevé des repères anatomiques restera vraisemblablement toujours le point critique. Cette étape nécessite un opérateur qualifié, appliqué et expérimenté. De ces qualités de l'opérateur dépend la qualité des résultats.

Cette méthode est abordable aussi bien financièrement que techniquement par les associations d'éleveurs auxquelles elle est destinée à terme. Mais sa justesse et sa fidélité doivent être évaluées, ce qui fait l'objet de la 3^{ème} partie de cette thèse.

3^{ème} Partie :

Evaluation de la méthode 3-D

I. Evaluations préliminaires

A. Justesse de la méthode

Elle a été évaluée expérimentalement en comparant les coordonnées connues de marqueurs sur la structure de calibration à celles calculées à l'aide de la DLT. La structure possède 24 « marqueurs ». Chaque marqueur fournit 2 équations. La structure fournit donc 48 équations. Or, en pratique, calibrer une caméra à l'aide de la méthode DLT revient à calculer 11 paramètres. On dispose donc de beaucoup plus d'équations que d'inconnues. L'erreur systématique de la méthode peut donc être calculée.

Elle provient essentiellement :

- des erreurs dues aux déformations de l'image produites par les lentilles des caméras ;
- des erreurs de relevé par l'opérateur qui ont été minimisées par la présence de marqueurs ;
- de la résolution des images ;
- des erreurs produites par la digitalisation (compression des images).

L'intérêt d'avoir autant de marqueurs est de répartir de façon homogène les erreurs dans tout l'espace calibré.

L'erreur moyenne commise sur la détermination de la position 3-D d'un repère (par exemple la hauteur d'un repère) est d'environ **0,55 cm**. Dans ces conditions, l'erreur maximale commise sur la mesure d'une distance est de **1,10 cm**, et l'erreur maximale sur la

mesure d'un angle (calculée entre 2 segments de 30 cm de long) est de 2° (POURCELOT, communication personnelle).

B. Evaluation expérimentale préliminaire de la méthode

L'évaluation expérimentale préliminaire de la méthode (LACROIX, 1999 ; POURCELOT *et al.*, 2002) a eu pour objectif de quantifier les effets sur les mesures des deux particularités essentielles de son protocole d'enregistrement : la position de référence du cheval (au pas et non au placer) et l'absence de marqueurs cutanés.

1. Comparaison des résultats obtenus au pas, canon vertical, et au placer

Une première expérimentation a été menée pour comparer la position de référence au pas et la position de référence au placer. Des marqueurs hémisphériques recouverts de scotch réfléchissant ont été fixés, à l'aide d'adhésif double face, sur la peau de 2 chevaux en regard de repères anatomiques précis. Ces chevaux ont ensuite été filmés à 5 reprises au pas puis au placer au cours d'une seule et même session d'enregistrement.

Les résultats de cette première expérimentation ont montré qu'il n'y a pas de différence significative entre les moyennes des mesures obtenues avec les deux méthodes. Cependant les hauteurs mesurées au pas sont toujours inférieures à celles mesurées au placer. Cela peut s'expliquer par la mise en charge du membre au pas. La variabilité intra-jour des mesures au pas était significativement plus faible que celle observée au placer, surtout en ce qui concerne les mesures des angles articulaires. La variabilité de certaines mesures effectuées au placer pouvaient dans certains cas atteindre plus du quadruple de celle observée au pas. Ces résultats montrent que l'obtention de paramètres morphométriques mesurés au pas est non seulement justifiée mais pertinente.

2. Comparaison des résultats obtenus avec et sans marqueurs cutanés

L'objectif de la seconde expérimentation était de comparer les résultats obtenus en utilisant une méthode avec marqueurs à celle qui a été développée, c'est-à-dire sans marqueurs. Pour cela, 2 chevaux ont été enregistrés à 5 reprises au cours de 5 jours différents. Chaque jour, 23 marqueurs ont été collés sur les chevaux puis ces derniers ont été enregistrés au pas, tenus en main, au cours d'un passage. Les marqueurs ont ensuite été retirés et un nouveau passage au pas, cette fois-ci sans marqueur, a été enregistré. Pour la méthode sans marqueurs, le traitement des enregistrements a été effectué comme indiqué dans la partie « présentation de la méthode ». Pour la méthode avec marqueurs, une routine informatique a été ajoutée au programme général. Cette routine a permis de détecter les marqueurs de façon automatique et de calculer leur barycentre. Les résultats obtenus par ces 2 méthodes ont alors été comparés statistiquement à l'aide du test t de Student ($p < 0,05$).

A l'exception des points du dos, aucune différence significative n'a été observée entre les résultats obtenus par l'une et l'autre méthodes. Les différences observées pour les points du dos étaient purement méthodologiques. Elles sont dues à la prise en compte de l'épaisseur des marqueurs en question dans la méthode avec marqueurs. Les résultats de cette seconde expérimentation montrent que l'utilisation de la méthode sans marqueurs est tout aussi précise que celle utilisant les marqueurs.

II. Etude de la répétabilité des mesures

Le relevé des repères anatomiques sur les images de référence est opérateur dépendant. Dans l'étude sur le suivi longitudinal de la croissance des poulains, le traitement et l'analyse des images ont été effectués par deux opératrices différentes. La première opératrice, Delphine Erlinger, a effectué la synchronisation des films, la sélection des images de référence, le relevé de la structure de calibration et le relevé des repères anatomiques pour les enregistrements des poulains à 6 et à 18 mois. En tant que deuxième opératrice, j'ai effectué le même travail sur les enregistrements des poulains à 3 ans. Dans un souci d'homogénéité des relevés, j'ai également relu les relevés des repères anatomiques de Delphine Erlinger sur les poulains à 6 et à 18 mois.

L'évaluation de la répétabilité des relevés a été effectuée sur les images d'un poulain de 18 mois traitées par Delphine Erlinger. Les relevés de D.Erlinger ont été retraités 5 fois (le 27/01/06, le 01/02/06, le 09/02/06, le 10/02/06, et le 11/02/06). La moyenne, l'écart-type (σ) et le coefficient de variation (CV) des coordonnées 3-D des 5 relectures ont été calculés pour chaque repère anatomique. Puis ces mêmes paramètres ont été calculés pour chaque paramètre morphométrique.

A. Résultats

1. Coordonnées des repères anatomiques

Les coordonnées 3-D des repères anatomiques lors des 5 répétitions sont présentés en annexe 1. Les tableaux 1, 2, 3 et 4 présentent l'écart-type des coordonnées en x, en y et en z (σ_x , σ_y et σ_z), l'écart-type M (σ_M = moyenne de σ_x , σ_y et σ_z) et le coefficient de variation (CV), calculé à partir de l'écart-type M.

L'écart-type moyen pour l'ensemble des repères anatomiques est de 0,32 cm. L'écart-type moyen des repères anatomiques des IR-Ant ($\sigma = 0,37$ cm) est plus élevé que celui des repères anatomiques des IR-Post ($\sigma = 0,27$ cm).

Concernant les écarts-types des coordonnées, l'écart-type en x de l'ensemble des repères anatomiques (0,53 cm) est bien plus élevée que celui en y (0,22 cm) et en z (0,21 cm). C'est également le cas avec l'écart-type moyen des coordonnées des repères des IR-Ant ($\sigma_x = 0,59$ cm vs. $\sigma_y = 0,28$ cm et $\sigma_z = 0,22$ cm) et avec celui des IR-Post ($\sigma_x = 0,45$ cm vs. $\sigma_y = 0,14$ cm et $\sigma_z = 0,20$ cm).

o Repères anatomiques de la tête et de l'encolure

Les résultats sont présentés dans le tableau 1. Les écarts-types moyens du sommet de la tête (T1) et de la base de l'encolure (T3) sont très faibles. En revanche, l'écart-type M de la base de la tête (T2) est élevée. Son écart-type en y est faible, mais ceux en x et en z sont bien plus élevés.

Tableau 1 : Ecarts-types (cm) des coordonnées des repères anatomiques de la tête et de l'encolure calculées en 3-D. Les écarts-types cités dans le texte sont surlignées en différentes couleurs en fonction de leur valeur : $\sigma \leq 0,25$ cm, $\sigma =]0,25-0,75]$ cm, $\sigma =]0,75-1,25]$ cm, $\sigma =]1,25-1,75]$ cm, $\sigma =]1,75-2,25]$ cm, $\sigma \geq 2,25$ cm.

		Coordonnées	x	y	z	MOYENNES
IR-Ant	Repère T1 : Bout du nez	Ecarts-types (cm)	0,01	0,11	0,00	0,04
		Coefficient de variation (%)	0,00	0,16	0,00	0,06
	Repère T2 : Base de la tête	Ecarts-types (cm)	1,82	0,11	0,52	0,82
		Coefficient de variation (%)	0,67	0,16	0,36	0,40
	Repère T3 : Base de l'encolure	Ecarts-types (cm)	0,01	0,23	0,00	0,08
		Coefficient de variation (%)	0,00	0,36	0,00	0,12

o Repères anatomiques de la partie distale des membres

Les résultats sont présentés dans le tableau 2.

Les écarts-types M des repères des doigts antérieurs et postérieurs sont très faibles (A1, A2, A3 et P1, P2, P3). C'est également le cas pour l'articulation carpo-métacarpienne (A4), pour l'extrémité distale du radius (A5).

L'écart-type M des coordonnées du repère de l'articulation tarso-métatarsienne (P4), de l'extrémité distale du tibia (P5) et de la pointe du jarret (P6) sont faibles. P4 et P6 ont une variabilité faible ou nulle en x et en y, mais une plus grande variabilité en z. P5 a une variabilité très faible en y et z, mais une plus grande variabilité en x.

Tableau 2 : Ecarts-types (cm) des coordonnées des repères anatomiques de la partie distale des membres calculées en 3-D. Les écarts-types cités dans le texte sont surlignés en différentes couleurs en fonction de leur valeur : $\sigma \leq 0,25$ cm, $\sigma =]0,25-0,75]$ cm, $\sigma =]0,75-1,25]$ cm, $\sigma =]1,25-1,75]$ cm, $\sigma =]1,75-2,25]$ cm, $\sigma \geq 2,25$ cm.

Coordonnées		x	y	z	MOYENNES	
IR-Ant	Repère A1 : Pied	Ecarts-types (cm)	0,00	0,00	0,00	0,00
		Coefficient de variation (%)	0,00	0,00	0,00	0,00
	Repère A2 : Couronne	Ecarts-types (cm)	0,00	0,00	0,00	0,00
		Coefficient de variation (%)	0,00	0,00	0,00	0,00
	Repère A3 : Boulet	Ecarts-types (cm)	0,00	0,11	0,01	0,04
		Coefficient de variation (%)	0,00	0,21	0,04	0,08
Repère A4 : Art. carpo-métacarpienne	Ecarts-types (cm)	0,00	0,11	0,01	0,04	
	Coefficient de variation (%)	0,00	0,21	0,01	0,07	
Repère A5 : Extrémité distale du radius	Ecarts-types (cm)	0,16	0,07	0,00	0,08	
	Coefficient de variation (%)	0,09	0,13	0,00	0,07	
IR-Post	Repère P1 : Pied	Ecarts-types (cm)	0,00	0,00	0,00	0,00
		Coefficient de variation (%)	0,00	0,00	0,00	0,00
	Repère P2 : Couronne	Ecarts-types (cm)	0,00	0,00	0,00	0,00
		Coefficient de variation (%)	0,00	0,00	0,00	0,00
	Repère P3 : Boulet	Ecarts-types (cm)	0,24	0,01	0,01	0,09
		Coefficient de variation (%)	0,82	0,02	0,05	0,30
Repère P4 : Art. tarso-métatarsienne	Ecarts-types (cm)	0,15	0,03	0,69	0,29	
	Coefficient de variation (%)	0,54	0,05	1,60	0,73	
Repère P5 : Extrémité distale du tibia	Ecarts-types (cm)	0,47	0,03	0,00	0,17	
	Coefficient de variation (%)	1,38	0,07	0,01	0,49	
Repère P6 : Pointe du jarret	Ecarts-types (cm)	0,02	0,01	0,34	0,12	
	Coefficient de variation (%)	0,09	0,01	0,54	0,21	

○ Repères anatomiques de la partie proximale des membres

Les résultats sont présentés dans le tableau 3.

▪ Membre antérieur

Les écarts-types moyens du coude (A6) et de la pointe de l'épaule (A7) sont de valeurs intermédiaires. La variabilité des coordonnées du coude est faible en y, moyenne en x et forte en z. La variabilité des coordonnées de la pointe de l'épaule est faible en z et moyenne en x et en y.

▪ Membre postérieur

La rotule (P7) a un écart-type M de valeur intermédiaire et ses coordonnées en x, en y et en z ont toutes un écart-type du même ordre de grandeur.

L'articulation de la hanche (P8) a un écart-type M très faible.

La pointe de la fesse (P9) a un écart-type M faible. Les coordonnées en x et en z ont un écart-type très faibles et sa coordonnée en y a un écart-type de valeur intermédiaire.

La tubérosité tibiale (P13) a un écart-type M de valeur intermédiaire. Sa coordonnée en y a un écart-type faible et celles en x et en y ont des écarts-types un peu supérieurs.

Le tuber coxae (P10) est un repère qui a été relevé à la fois sur les IR-Ant (A11) et sur les IR-Post (P10). Sur les IR-Ant, l'écart-type M est faible. Les coordonnées en x et en z ont des écarts-types plus élevés que celle en y. Sur les IR-Post, l'écart-type moyen est très faible. Les coordonnées en x et en y ont des écarts-types plus faibles que celle en z.

Tableau 3 : Ecart-types (cm) des coordonnées des repères anatomiques de la partie proximale des membres calculées en 3-D. Les écart-types cités dans le texte sont surlignés en différentes couleurs en fonction de leur valeur : $\sigma \leq 0,25$ cm, $\sigma =]0,25-0,75]$ cm, $\sigma =]0,75-1,25]$ cm, $\sigma =]1,25-1,75]$ cm, $\sigma =]1,75-2,25]$ cm, $\sigma \geq 2,25$ cm.

		Coordonnées	x	y	z	MOYENNES
IR-Ant	Repère A6 : Coude	Ecart-types (cm)	0,52	0,10	1,62	0,75
		Coefficient de variation (%)	0,28	0,20	1,96	0,82
	Repère A7 : Pointe de l'épaule	Ecart-types (cm)	0,73	0,53	0,13	0,46
		Coefficient de variation (%)	0,36	1,27	0,12	0,58
	Repère A11 : Tuber coxae	Ecart-types (cm)	0,42	0,29	0,37	0,36
		Coefficient de variation (%)	0,38	0,75	0,27	0,47
IR-Post	Repère P7 : Rotule	Ecart-types (cm)	0,49	0,43	0,43	0,45
		Coefficient de variation (%)	0,85	1,02	0,43	0,77
	Repère P8 : Art. de la hanche	Ecart-types (cm)	0,01	0,01	0,12	0,05
		Coefficient de variation (%)	0,03	0,02	0,09	0,05
	Repère P9 : Pointe de la fesse	Ecart-types (cm)	0,10	0,64	0,02	0,25
		Coefficient de variation (%)	0,45	1,36	0,01	0,61
	Repère P10 : Tuber coxae	Ecart-types (cm)	0,01	0,02	0,22	0,08
		Coefficient de variation (%)	0,01	0,04	0,15	0,07
	Repère P13 : Tubérosité tibiale	Ecart-types (cm)	0,74	0,35	0,60	0,56
		Coefficient de variation (%)	1,44	0,80	0,68	0,98

○ Repères anatomiques du dos et passage de sangle

Les résultats sont présentés dans le tableau 4.

Le repère du creux du dos (A9) a un écart-type M élevé. Sa coordonnée en z a un écart-type faible, mais celles en y et en x ont des écarts-types bien plus élevés.

Le tuber sacrale a été relevé à la fois sur les IR-Ant (A10) et sur les IR-Post (P11). Sur les IR-Ant et sur les IR-Post l'écart-type M est de valeur intermédiaire. Sur les IR-Ant, ses coordonnées en x et en y ont des écarts-types de valeur intermédiaire et sa coordonnée en z un écart-type très faible. Sur les IR-Post, ses coordonnées en y et en z ont un écart-type très faible et celle en x un écart-type très élevé.

Le garrot a été relevé à la fois sur les IR-Ant (A8) et sur les IR-Post (P12). Sur les IR-Ant et sur les IR-Post, l'écart-type M est élevé. Leur coordonnées en z ont des écarts-types faibles, celles en y ont des écarts-types moyens (IR-Ant) ou élevés (IR-Post) et celles en x ont des écarts-types très élevés.

Le passage de sangle (A12) a un écart-type M quasi-nul.

Tableau 4 : *Ecarts-types (cm) des coordonnées des repères anatomiques du dos et du passage de sangle calculées en 3-D. Les écarts-types cités dans le texte sont surlignés en différentes couleurs en fonction de leur valeur : $\sigma \leq 0,25$ cm, $\sigma =]0,25-0,75]$ cm, $\sigma =]0,75-1,25]$ cm, $\sigma =]1,25-1,75]$ cm, $\sigma =]1,75-2,25]$ cm, $\sigma \geq 2,25$ cm.*

		Coordonnées	x	y	z	MOYENNES
IR-Ant	<u>Repère A8 :</u> Garrot	Ecarts-types (cm)	3,07	1,11	0,25	1,48
		Coefficient de variation (%)	1,77	1,79	0,16	1,24
	<u>Repère A9 :</u> Creux du dos	Ecarts-types (cm)	1,61	0,74	0,36	0,90
		Coefficient de variation (%)	1,06	1,19	0,24	0,83
	<u>Repère A10 :</u> Tuber Sacrale	Ecarts-types (cm)	0,56	0,73	0,06	0,45
		Coefficient de variation (%)	0,57	1,28	0,04	0,63
	<u>Repère A12 :</u> Passage de sangle	Ecarts-types (cm)	0,00	0,00	0,00	0,00
		Coefficient de variation (%)	0,00	0,00	0,00	0,00
IR-Post	<u>Repère P11 :</u> Tuber Sacrale	Ecarts-types (cm)	0,80	0,03	0,08	0,30
		Coefficient de variation (%)	1,36	0,05	0,05	0,49
	<u>Repère P12 :</u> Garrot	Ecarts-types (cm)	2,83	0,32	0,15	1,10
		Coefficient de variation (%)	2,05	0,49	0,10	0,88

2. Paramètres morphométriques

L'étude de la variabilité des paramètres morphométrique se focalise sur les paramètres morphométriques directs à partir desquels sont calculés les autres paramètres (indirects). Ces paramètres morphométriques directs peuvent être classés en deux catégories :

- les distances qui comprennent les hauteurs, les longueurs et les largeurs ;
- les angles 3-D qui comprennent les angles articulaires, les angles de certains segments par rapport à l'horizontale et l'orientation des rayons osseux des membres par rapport à la verticale.

Les résultats sont présentés en annexe 2.

a- Les distances

La moyenne des écarts-types de toutes les distances directes est de 0,90 cm. Les hauteurs ont un écart-type moyen ($\sigma = 0,25$ cm) plus petit que les longueurs ($\sigma = 0,89$ cm) et que les largeurs ($\sigma = 1,22$ cm).

1- Les hauteurs

▪ Membre antérieur et encolure

Les résultats sont présentés dans la figure 22. La variabilité moyenne de ces hauteurs est faible ($\sigma = 0,27$ cm, CV = 0,29%) avec des écarts-types moyens compris entre 0 et 0,24 cm et un CV compris entre 0 et 0,36 %, excepté pour la hauteur du coude (A6) qui a une variabilité bien plus élevée ($\sigma = 1,96$ cm, CV = 1,62%).

▪ Membre postérieur

Les résultats sont présentés dans la figure 23. La plupart des hauteurs du membre postérieur ont une variabilité faible ($\sigma = 0-0,22$ cm et CV = 0-0,15%). Trois hauteurs ont une variabilité bien plus élevée : l'articulation tarso-métatarsienne (P4 : $\sigma = 0,69$ cm, CV = 1,59 %), la rotule (P7 : $\sigma = 0,42$ cm, CV = 0,48 %) et la tubérosité tibiale (P13 : $\sigma = 0,66$ cm, CV = 0,77 %). La variabilité moyenne reste faible ($\sigma = 0,25$ cm, CV = 0,34 %).

Figure 22 : Représentation des hauteurs calculées en 3-D à partir des IR-Ant sur une vue de profil
(Dessin de J-M. Denoix)

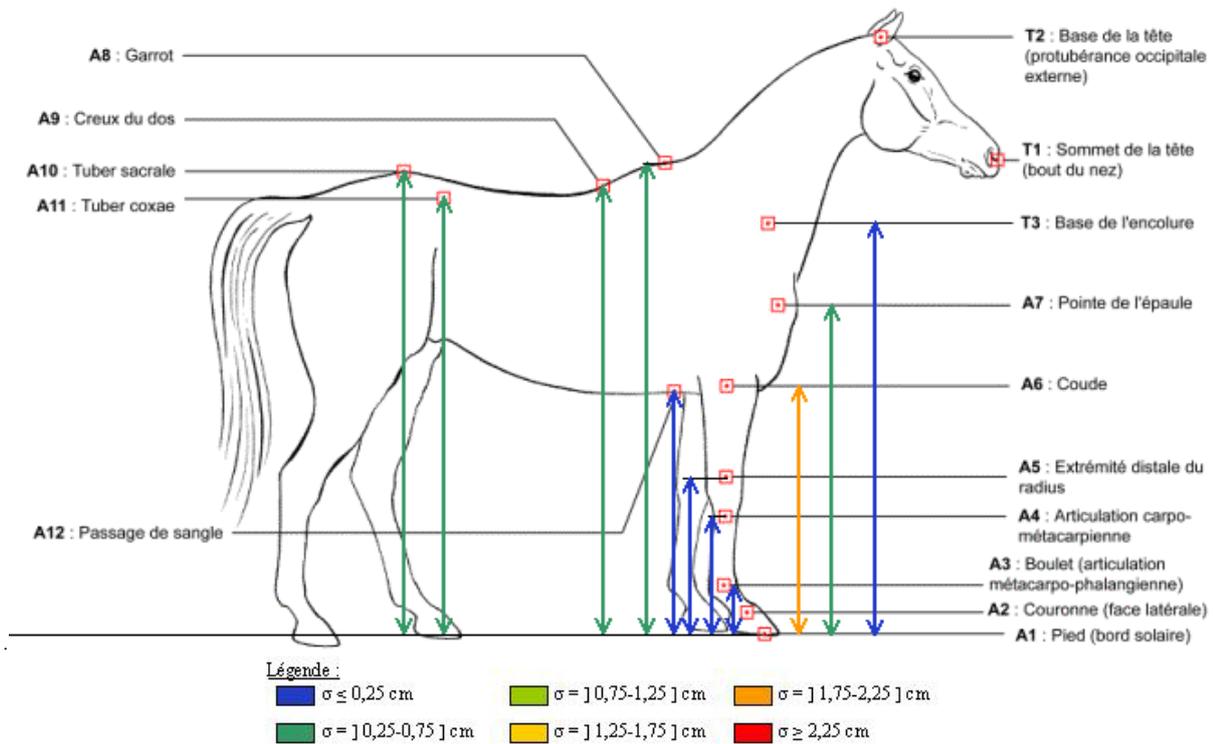
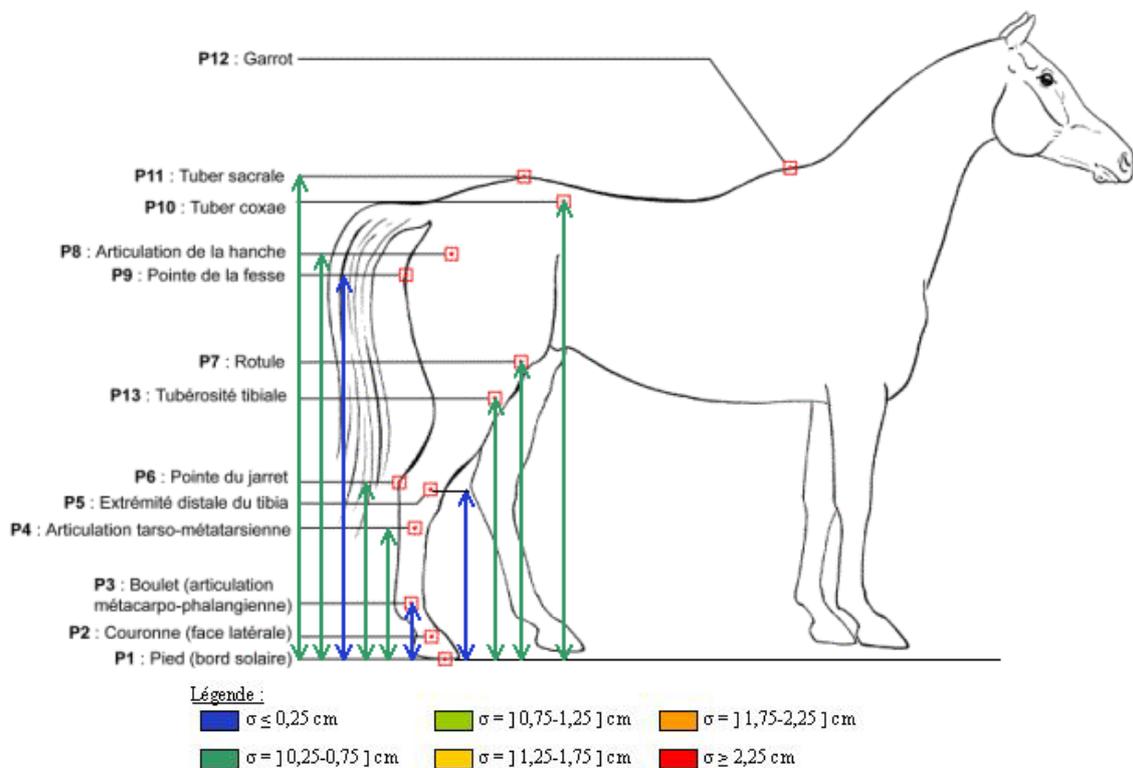


Figure 23 : Représentation des hauteurs calculées en 3-D à partir des IR-Post sur une vue de profil
(Dessin de J-M. Denoix).



2- Les longueurs

▪ Membre antérieur

Les résultats sont présentés dans les figures 24 et 25. La variabilité moyenne des longueurs du membre antérieur est élevée ($\sigma = 1,19$ cm, CV = 5,65 %). Deux longueurs ont un CV supérieur à la moyenne : celle entre le garrot et le creux du dos (A8→A9 : $\sigma = 4,09$ cm, CV = 18,82 %) et la distance verticale entre le passage de sangle et le coude (A12→A6 : $\sigma = 0,96$ cm, CV = 61,45 %). Ces deux longueurs exclues, la variabilité moyenne est beaucoup moins élevée ($\sigma = 1,05$ cm, CV = 2,02 %).

Les longueurs concernant la partie distale du membre ont une variabilité très faible ($\sigma = 0-0,02$ cm, CV = 0-0,16 %). Les longueurs concernant le thorax ont une variabilité faible ($\sigma = 0,25-0,42$ cm, CV = 0,36-0,72 %). Les autres ont une variabilité plus élevée ($\sigma = 0,62-2,91$ cm, CV = 2,35-4,85 %).

▪ Tête et Encolure

Les résultats sont présentés dans la figure 24. La variabilité moyenne des longueurs de la tête et de l'encolure est élevée ($\sigma = 2,26$ cm, CV = 2,66 %). La longueur de la tête a une variabilité faible (T1→T2 : $\sigma = 0,75$ cm, CV = 1,28 %). La longueur de l'encolure a une variabilité moyenne (T2→T3 : $\sigma = 1,62$ cm, CV = 2,26 %). La distance entre la base de la tête et le garrot a une variabilité très élevée (T2→A8 : $\sigma = 4,40$ cm, CV = 4,44 %).

Figure 24 : Représentation des longueurs calculées en 3-D à partir des IR-Ant sur une vue de profil (Dessin J-M. Denoix).

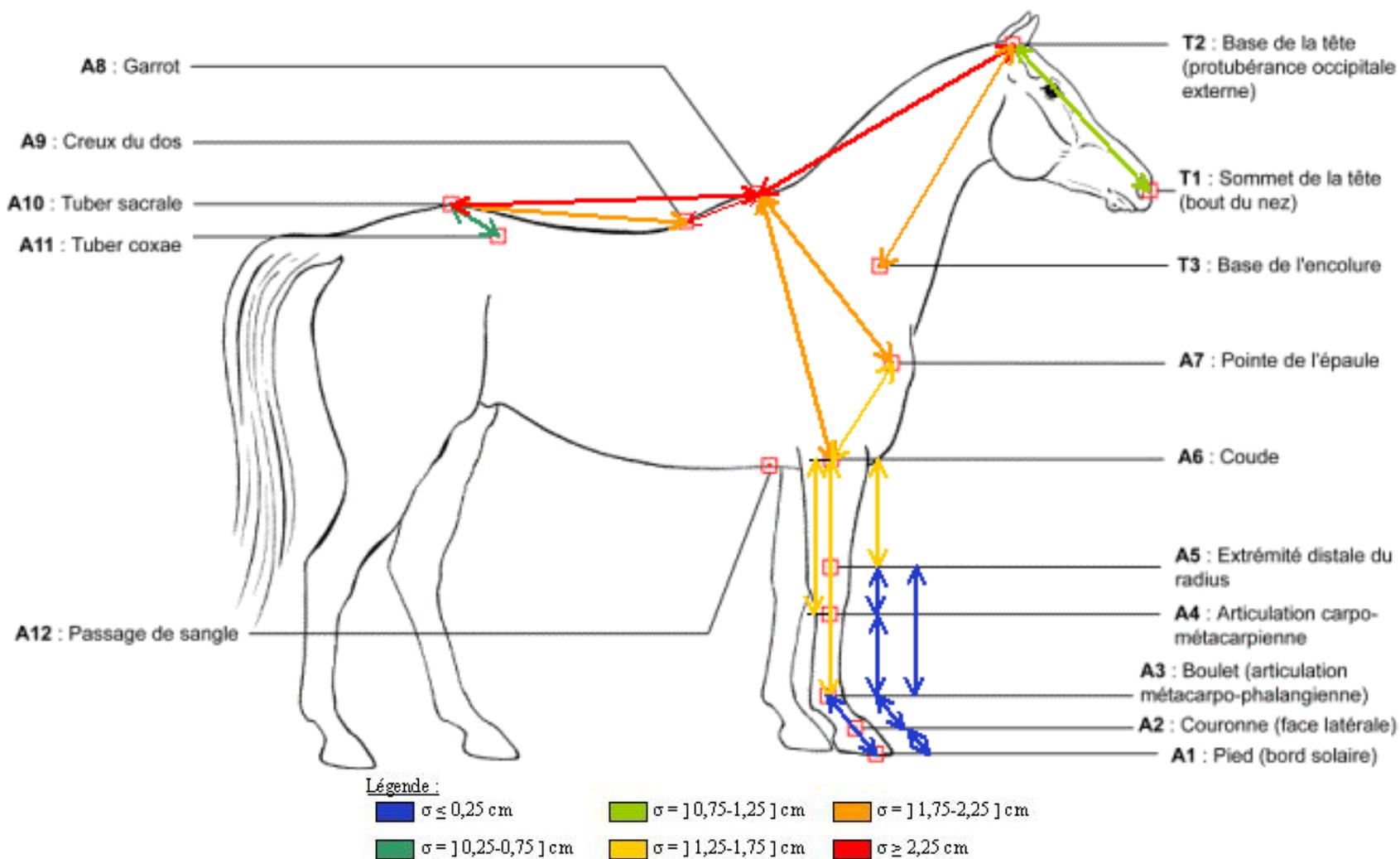
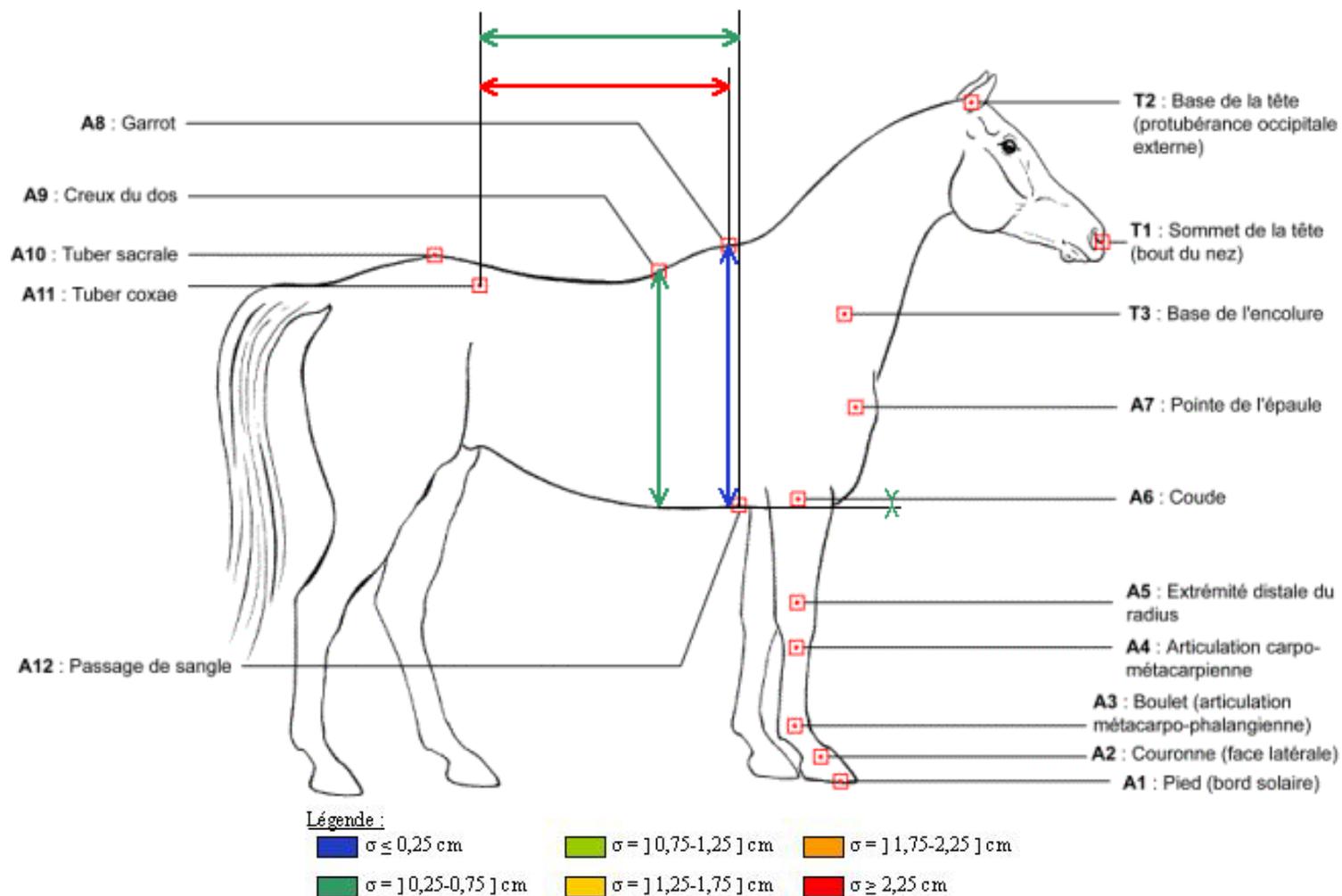


Figure 25 : Représentation des distance horizontales et verticales calculées en 3-D à partir des IR-Ant sur une vue de profil (Dessin J-M. Denoix).



- Membre postérieur

Les résultats sont présentés dans figures 26 et 27. La variabilité moyenne des longueurs du membre postérieur est faible ($\sigma = 0,52$ cm, CV = 2,59 %). La distance horizontale entre la pointe du jarret et la pointe de la fesse est très petite (0,52 cm) ce qui entraîne, malgré un écart-type très faible (0,12 cm), un CV extrêmement élevé (23,5 %). En excluant cette distance, le CV moyen est de 1,85 %. Les longueurs du doigt ont une variabilité très faible ($\sigma = 0-0,16$ cm, CV = 0-1,21 %). Les coefficients de variation élevés (>3 %) s'expliquent surtout soit par un écart-type élevé, soit par une petite longueur.

3-Les largeurs

La largeur de l'épaule (A7) a un coefficient de variation très élevé (CV = 6,41 %), dû à un écart-type très élevé ($\sigma = 3,06$ cm) et à une valeur moyenne intermédiaire (47,77 cm). Les largeurs du membre postérieur, c'est-à-dire celle de l'articulation de la hanche (P8 : $\sigma = 0,36$ cm, CV = 1,48 %) et celle du tuber coxae (P10 : $\sigma = 0,24$ cm, CV = 0,60 %) ont une variabilité faible.

Figure 26 : Représentation des longueurs calculées en 3-D à partir des IR-Post sur une vue de profil (Dessin J-M. Denoix)

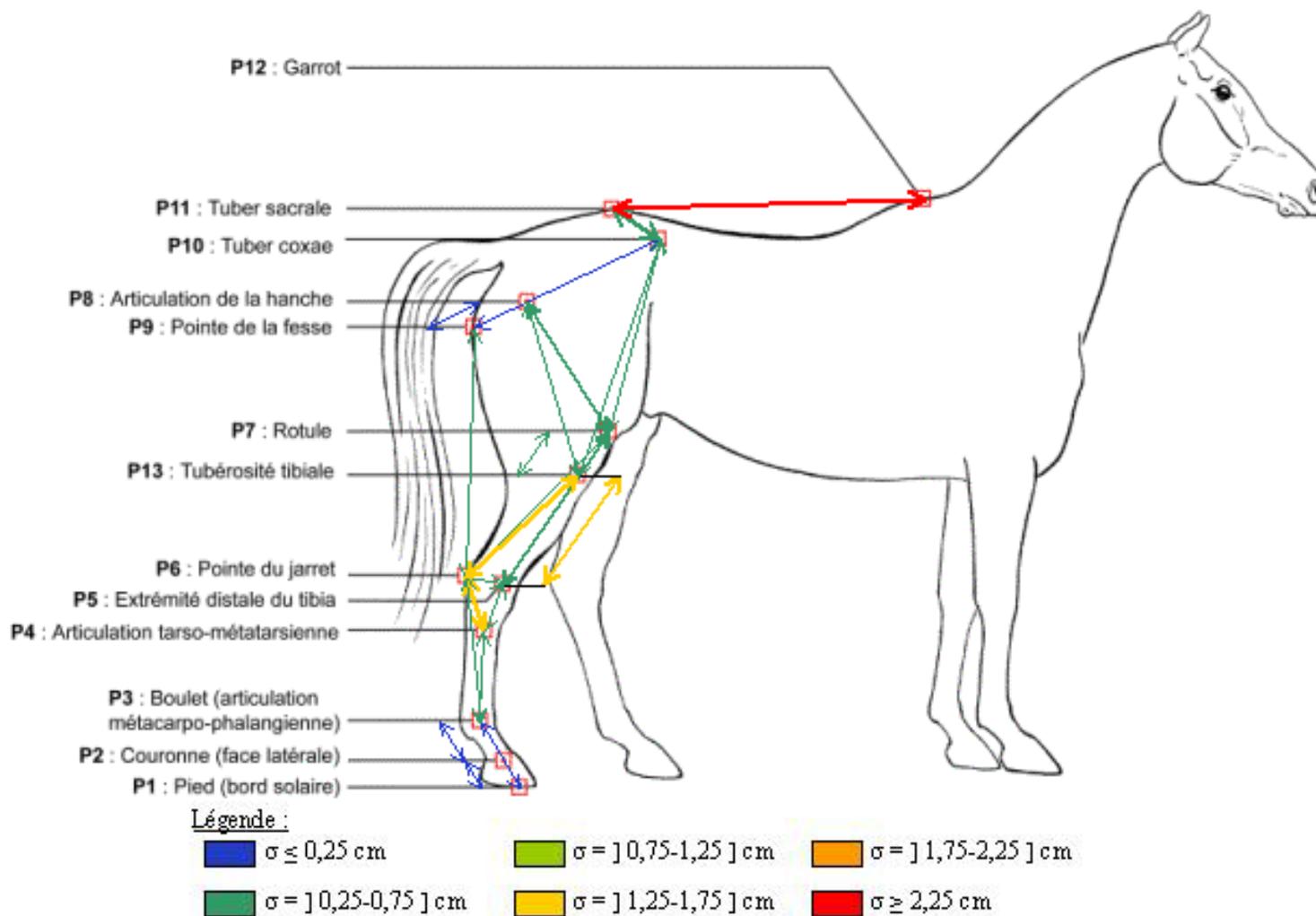
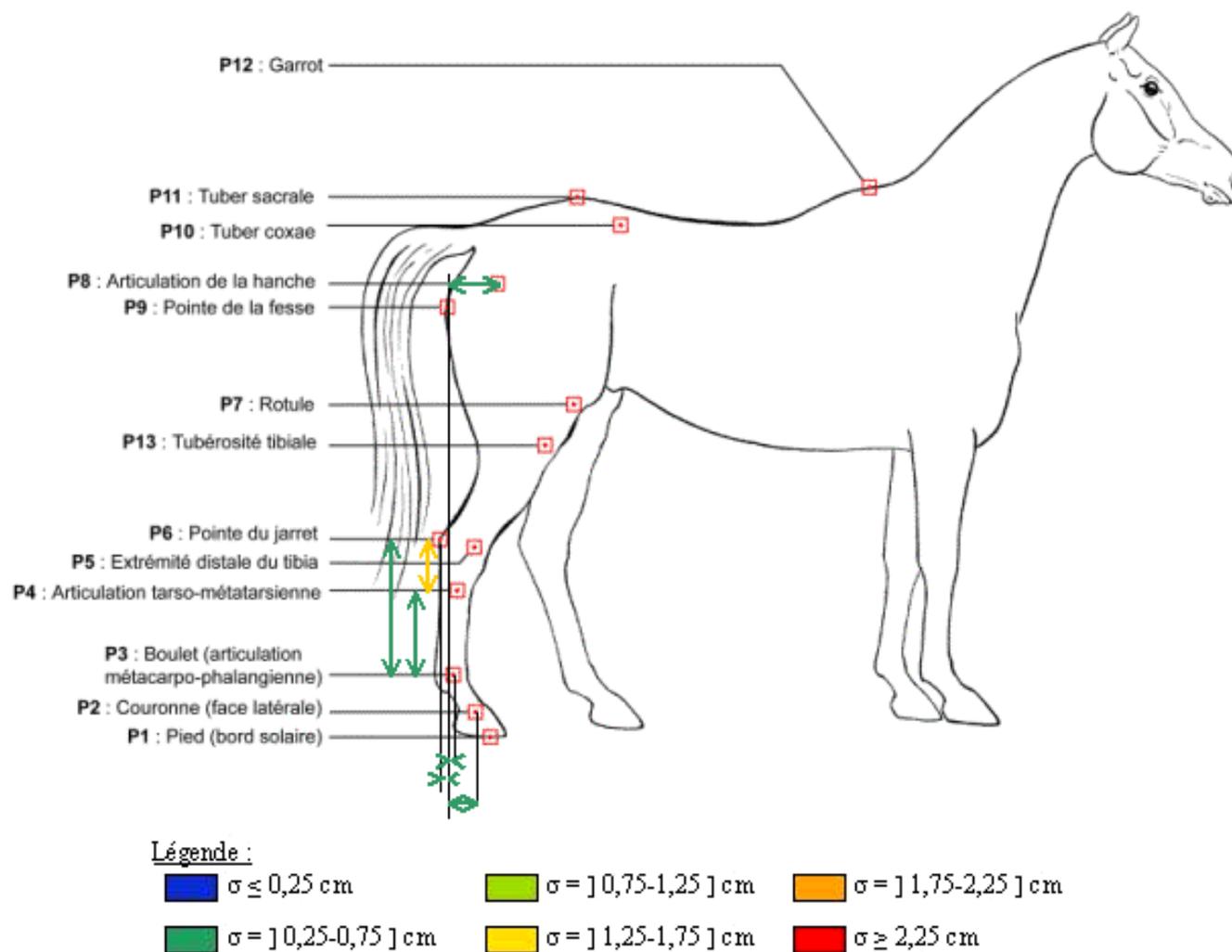


Figure 27 : Représentation des distance horizontales et verticales calculées en 3-D à partir des IR-Ant sur une vue de profil (Dessin J-M. Denoix)



b- Les angles 3-D

La moyenne des écarts-types de tous les angles directs est de 1° . Les angles articulaires ont un écart-type moyen ($\sigma = 1,19^\circ$) plus grand que celui des angles par rapport à l'horizontale ($\sigma = 0,85^\circ$) et que celui des angles par rapport à la verticale ($\sigma = 0,63^\circ$).

1-Les angles articulaires

La moyenne des écarts-types des angles articulaires des IR-Ant ($\sigma = 1^\circ$) est plus petite que celle des IR-Post ($\sigma = 1,27^\circ$).

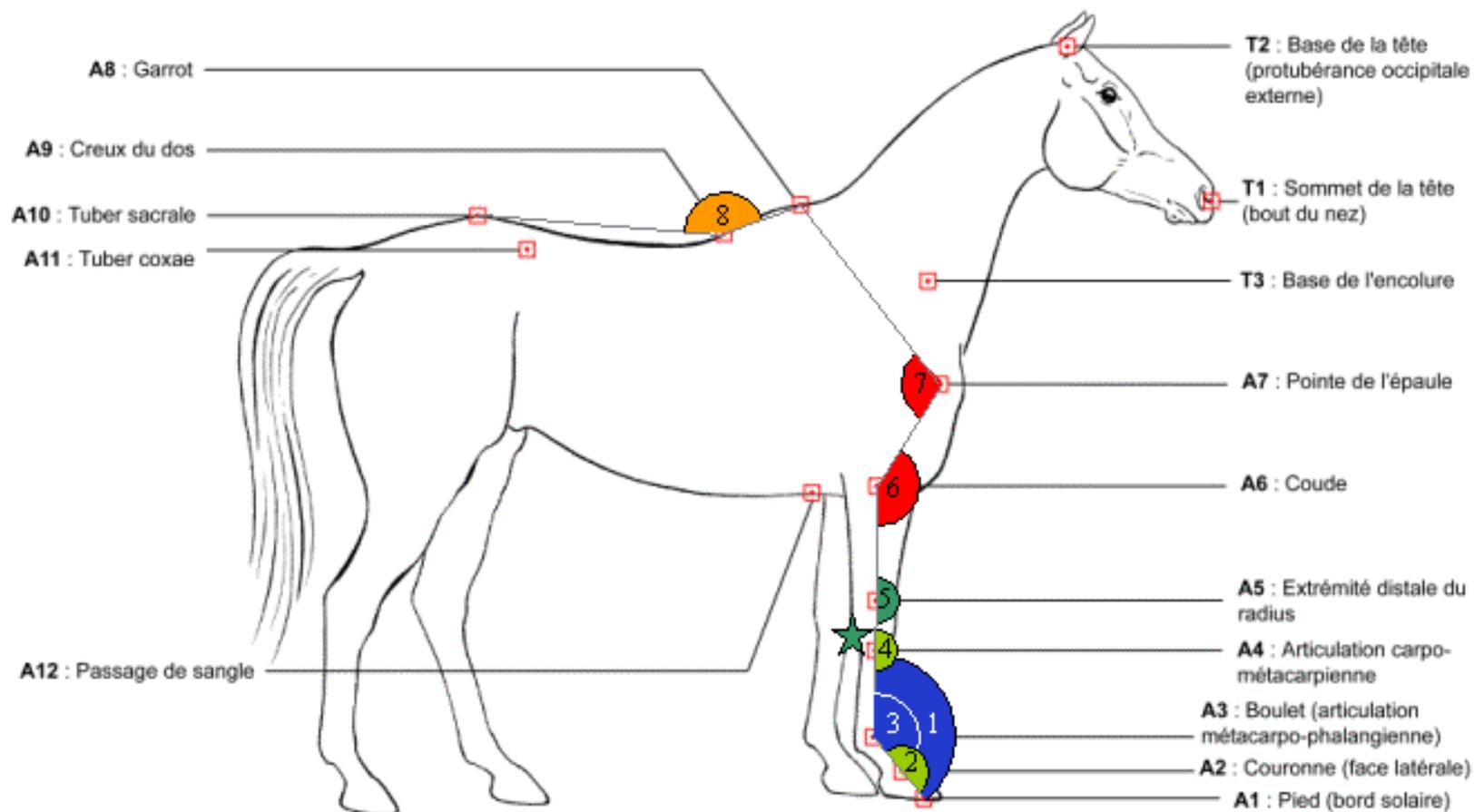
▪ Membre antérieur

Les résultats sont présentés dans la figure 28. Les angles articulaires du membre antérieur ont un écart-type moyen de valeur intermédiaire ($\sigma = 1^\circ$, CV = 0,70 %). Trois angles ont un écart-type supérieur à la moyenne : l'angle de l'épaule (A6-A7-A8 : $\sigma = 2,28^\circ$, CV = 2,21 %), l'angle du coude (A5-A6-A7 : $\sigma = 2,62^\circ$, CV = 1,72 %) et l'angle du creux du dos (A8-A9-A10 : $\sigma = 1,71^\circ$, CV = 1,06 %). Les autres ont une variabilité faible ($\sigma = 0,02-0,72^\circ$, CV = 0,02-0,40 %).

▪ Membre postérieur

Les résultats sont présentés dans figures 29 et 30. Les angles articulaires du membre postérieur ont un écart-type moyen de valeur intermédiaire ($\sigma = 1,27^\circ$, CV = 0,90 % et $\sigma = 0,18^\circ-2,65^\circ$, CV = 0,10-1,53%). La moyenne du coefficient de variation ne prend pas en compte le coefficient de variation de l'angle du bassin (P8-P9-P10) qui est extrêmement élevé (CV = 723,29%). L'angle du bassin a pourtant un écart-type moyen ($\sigma = 1,09^\circ$), et son coefficient de variation extrêmement élevé s'explique par sa moyenne extrêmement faible ($0,15^\circ$).

Figure 28 : Représentation des angles articulaires calculés en 3-D à partir des IR-Ant sur une vue de profil (Dessin J-M. Denoix)



Légende :

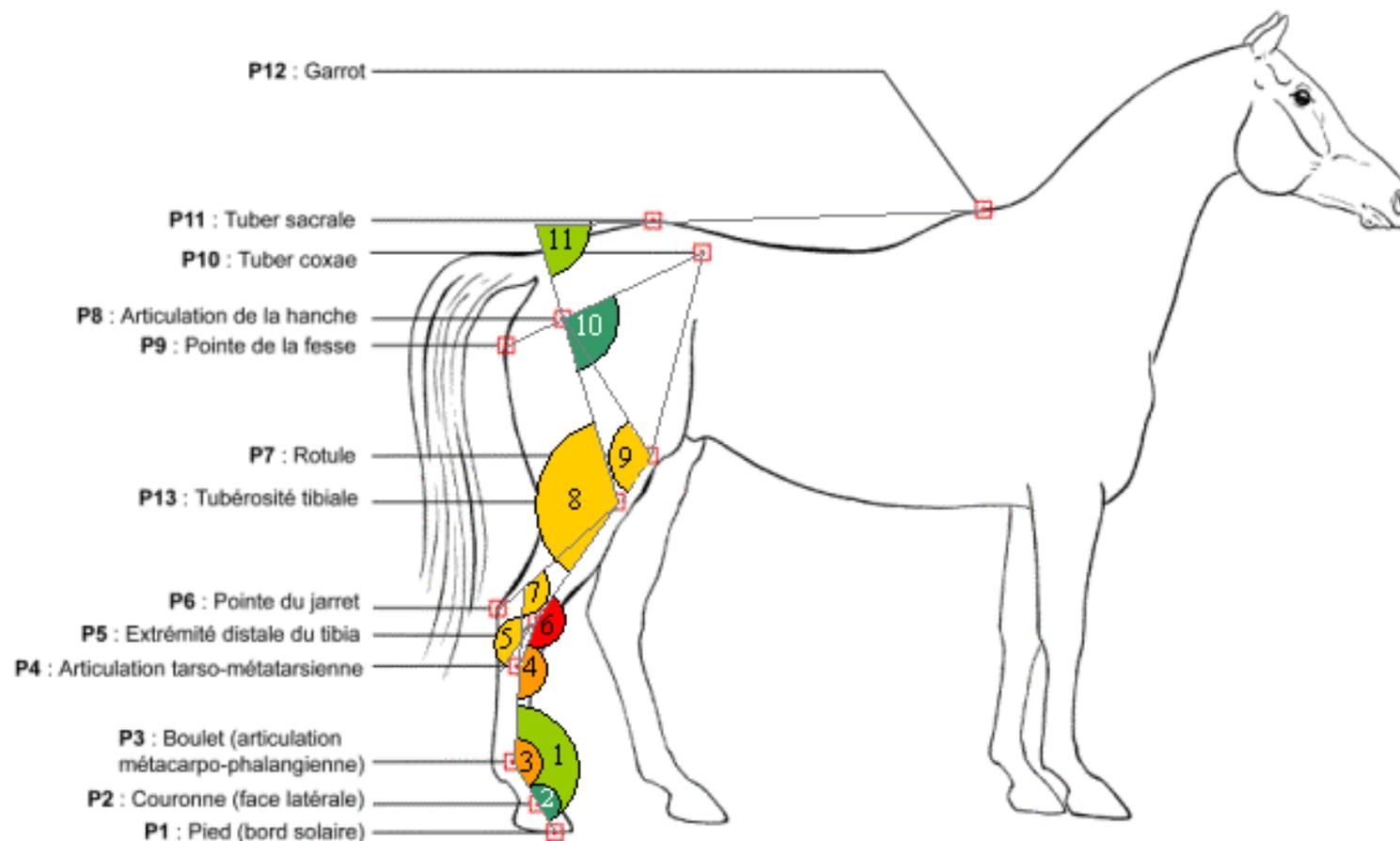
- | | | |
|--|--|--|
| ■ $\sigma < 0,05^\circ$ | ■ $\sigma =]0,5^\circ-1^\circ]$ | ■ $\sigma =]1,5^\circ-2^\circ]$ |
| ■ $\sigma =]0,05^\circ-0,5^\circ]$ | ■ $\sigma =]1^\circ-1,5^\circ]$ | ■ $\sigma > 2^\circ$ |

- 1 : Angle A1-A3-A4
 2 : Angle A1-A2-A3
 3 : Angle A2-A3-A4

- 4 : Angle A3-A4-A5
 5 : Angle A4-A5-A6
 6 : Angle du coude A5-A6-A7

- 7 : Angle de l'épaule A6-A7-A8
 8 : Angle du creux du dos A8-A9-A10

Figure 29 : Représentation des angles articulaires calculés en 3-D à partir des IR-Post sur une vue de profil, 1^{ère} partie (Dessin J-M. Denoix)



Légende :

$\sigma < 0,05^\circ$

$\sigma =]0,5^\circ - 1^\circ]$

$\sigma =]1,5^\circ - 2^\circ]$

1 : Angle P1-P3-P4

4 : Angle P3-P4-P5

7 : Angle P3-P4 / P6-P13

10 : Angle P13-P8 / P9-P10

$\sigma =]0,05^\circ - 0,5^\circ]$

$\sigma =]1^\circ - 1,5^\circ]$

$\sigma > 2^\circ$

2 : Angle P1-P2-P3

5 : Angle P3-P4 / P5-P13

8 : Angle P5-P13-P8

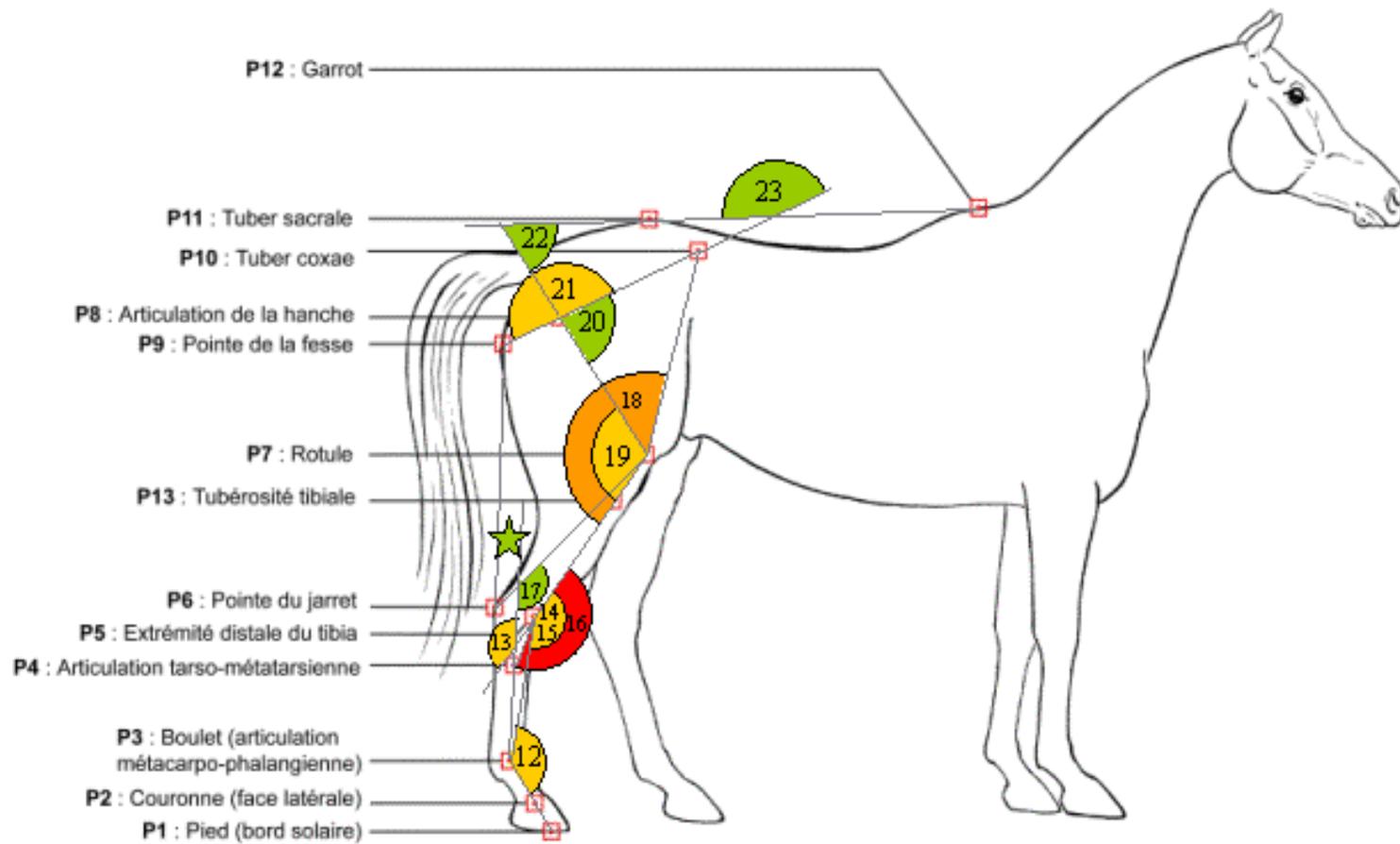
11 : Angle P13-P8 / P11-P12

3 : Angle P2-P3-P4

6 : Angle P4-P5-P13

9 : Angle P5-P13 / P7-P8

Figure 30 : Représentation des angles articulaires calculés en 3-D à partir des IR-Post sur une vue de profil, 2^{ème} partie (Dessin J-M. Denoix)



Légende :

 $\sigma < 0,05^\circ$

 $\sigma =]0,5^\circ - 1^\circ]$

 $\sigma =]1,5^\circ - 2^\circ]$

 $\sigma =]0,05^\circ - 0,5^\circ]$

 $\sigma =]1^\circ - 1,5^\circ]$

 $\sigma > 2^\circ$

12 : Angle P2-P3-P5

13 : Angle P3-P4 / P5-P7

14 : Angle P3-P5-P7

15 : Angle P3-P5-P13

16 : Angle P4-P5-P7

17 : Angle P3-P4 / P6-P7

18 : Angle P10-P7-P5

19 : Angle P5-P7-P8

20 : Angle P7-P8 / P9-P10

21 : Angle P8-P9-P10

22 : Angle P7-P8 / P11-P12

23 : Angle P9-P10 / P11-P12

★ Angle P7-P8 / P9-P10

2- Les angles de certains segments par rapport à l'horizontale

Les résultats sont présentés dans figures 31 et 32. La moyenne des écarts-types des angles par rapport à l'horizontale des segments des IR-Ant ($1,43^\circ$) est plus grande que celle des IR-Post ($0,85^\circ$).

▪ Membre antérieur

L'inclinaison du doigt par rapport à l'horizontale a un écart-type très faible (A1-A3/H : $\sigma = 0,02^\circ$, CV = 0,05%). L'inclinaison du bras par rapport à l'horizontale a un écart-type moyen (A6-A7/H : $\sigma = 1,64^\circ$, CV = 3,05%). L'inclinaison de l'épaule par rapport à l'horizontale a un écart-type élevé (A7-A8/H : $\sigma = 2,63^\circ$, CV = 5,37%).

▪ Membre postérieur

Concernant le doigt, son inclinaison par rapport à l'horizontale a un écart-type faible (P1-P3/H : $\sigma = 0,45^\circ$, CV = 0,92%). L'angle que fait la deuxième phalange avec l'horizontale a un écart-type plus élevé (P2-P3/H : $\sigma = 0,77^\circ$, CV = 1,57%).

Concernant la jambe, l'angle que fait le segment rotule-pointe du jarret avec l'horizontale a un écart-type faible (P6-P7/H : $\sigma = 0,34^\circ$, CV = 0,77%). L'angle que fait le segment rotule-extrémité distale du tibia avec l'horizontale a un écart-type plus élevé (P7-P5/H : $\sigma = 1,05^\circ$, CV = 1,75%). L'angle que fait le segment tubérosité tibiale-pointe du jarret avec l'horizontale a un écart-type moyen (P13-P6/H : $\sigma = 0,70^\circ$, CV = 1,77%). L'angle que fait le tibia avec l'horizontale a un écart-type plus élevé (P13-P5/H : $\sigma = 1,00^\circ$, CV = 1,68%).

Concernant la cuisse, l'inclinaison du fémur par rapport à l'horizontale a un écart-type moyen (P7-P8/H : $\sigma = 0,72^\circ$, CV = 1,03%). L'angle que fait le segment tubérosité tibiale-articulation de la hanche avec l'horizontale a un écart-type plus faible (P13-P8/H : $\sigma = 0,64^\circ$, CV = 0,79%).

L'inclinaison du bassin par rapport à l'horizontale a un écart-type faible (P9-P10/H : $\sigma = 0,26^\circ$, CV = 1,90%).

Figure 31 : Représentation sur une vue de profil des angles de certains segments(IR-Ant) par rapport à l'horizontal calculés en 3-D (Dessin J-M. Denoix)

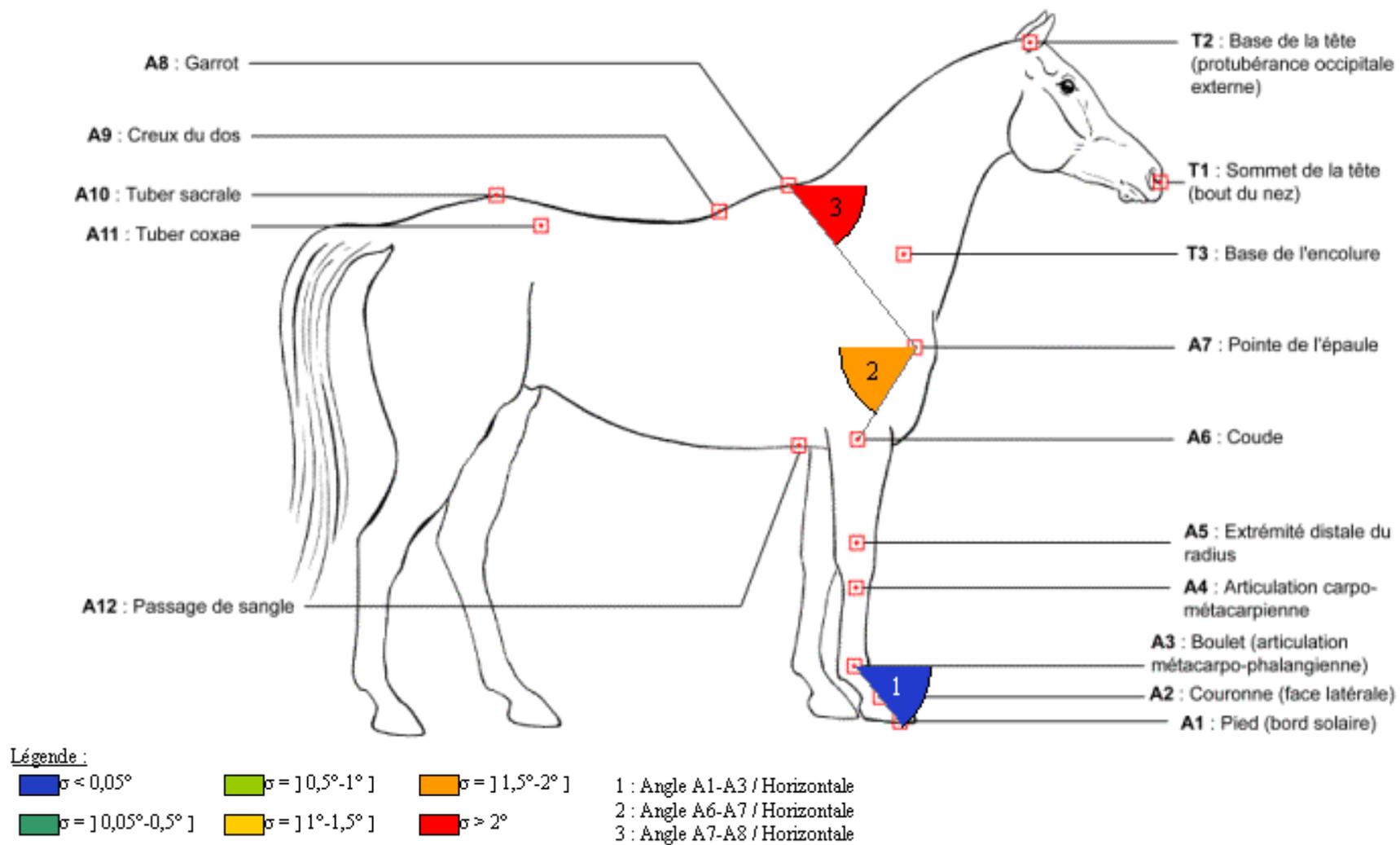
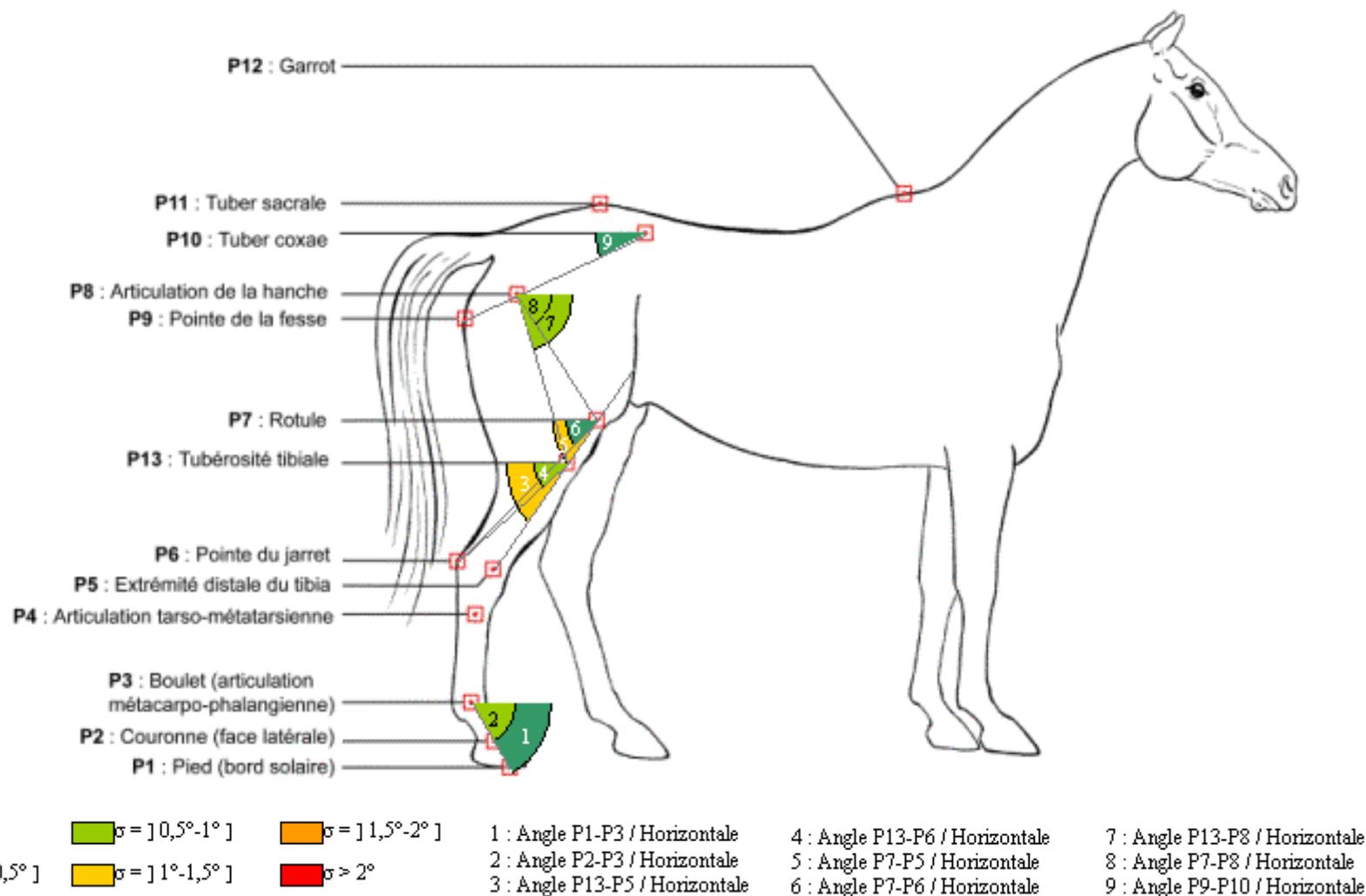


Figure 32 : Représentation sur une vue de profil des angles de certains segments(IR-Post) par rapport à l'horizontal calculés en 3-D (Dessin J-M. Denoix)



3- L'orientation des rayons osseux des membres par rapport à la verticale

Les résultats sont présentés dans le tableau 5. La moyenne des écarts-types des angles par rapport à la verticale des IR-Ant ($0,55^\circ$) est plus petite que celles des IR-Post ($0,70^\circ$).

▪ Membre antérieur

Concernant la main, les angles que font le doigt et le canon par rapport à la verticale ont des écarts-types très faibles (A3-A1/V : $\sigma = 0,02^\circ$, CV = 0,05% ; A4-A3/V : $\sigma = 0^\circ$, CV = 0,02%). L'angle que fait le segment extrémité distale du radius-boulet par rapport à la verticale a un écart-type faible mais il a un coefficient de variation élevé du fait de sa petite moyenne (A5-A3/V : $\sigma = 0,25^\circ$, CV = 5,99%).

L'angle que fait le segment coude-boulet a un écart-type faible mais il a un coefficient de variation élevé du fait de sa petite moyenne (A6-A3/V : $\sigma = 0,49^\circ$, CV = 7,03%). L'angle que fait l'avant-bras par rapport à la verticale a un écart-type moyen mais il a un coefficient de variation élevé du fait de sa petite moyenne (A6-A5/V : $\sigma = 0,87^\circ$, CV = 7,47%). L'angle que fait le bras par rapport à la verticale a un écart-type élevé (A6-A7/V : $\sigma = 1,64^\circ$, CV = 4,55%).

▪ Membre postérieur

Concernant le pied, l'angle du doigt par rapport à la verticale a un écart-type faible (P3-P1/V : $\sigma = 0,45^\circ$, CV = 1,12%) et l'angle de ce canon par rapport à la verticale à un écart-type moyen mais il a un coefficient de variation très élevé du fait de sa moyenne très petite (P4-P3/V : $\sigma = 0,72^\circ$, CV = 28,26%).

Concernant la jambe, l'angle du tibia par rapport à la verticale et l'angle du segment rotule –extrémité distale du tibia par rapport à la verticale ont des écarts-types moyens (P13-P5/V : $\sigma = 1^\circ$, CV = 3,33% et P7-P5/V : $\sigma = 1,05^\circ$, CV = 3,48%).

Concernant la cuisse, l'angle du fémur par rapport à la verticale a un écart-type moyen (P8-P7/V : $\sigma = 0,72^\circ$, CV = 3,52%). L'angle du segment articulation de la hanche-rotule par rapport à la verticale a un écart-type un peu plus petit mais il a un coefficient de variation plus élevé du fait de sa moyenne bien plus petite (P8-P13/V : $\sigma = 0,64^\circ$, CV = 6,77%).

L'angle du segment pointe de la fesse-pointe du jarret par rapport à la verticale a un écart-type faible mais il a un coefficient de variation extrêmement élevé du fait de sa moyenne extrêmement petite (P9-P6/V : $\sigma = 0,35^\circ$, CV = 62,29%).

Tableau 5 : Moyennes, écarts-types (σ) et coefficients de variation (CV) des angles de certains segments par rapport à la verticale calculés en 3-D. Les écarts-types cités dans le texte sont surlignés en différentes couleurs en fonction de leur valeur : $\sigma \leq 0,25$ cm, $\sigma =]0,25-0,75]$ cm, $\sigma =]0,75-1,25]$ cm, $\sigma =]1,25-1,75]$ cm, $\sigma =]1,75-2,25]$ cm, $\sigma \geq 2,25$ cm.

		Moyenne (degrés)	Ecart-type (degrés)	Coefficient de variation (%)
Membre antérieur	A3-A1/V	40,95	0,02	0,05
	A4-A3/V	-3,71	0,00	0,02
	A5-A3/V	-4,24	0,25	5,99
	A6-A3/V	-7,03	0,49	7,03
	A6-A5/V	-11,61	0,87	7,47
	A7-A6/V	-36,11	1,64	4,55
	MOYENNE	17,27	0,55	4,19
Membre postérieur	P3-P1/V	40,62	0,45	1,12
	P4-P3/V	2,55	0,72	28,26
	P7-P5/V	-30,13	1,05	3,48
	P8-P7/V	20,33	0,72	3,52
	P8-P13/V	9,44	0,64	6,77
	P9-P6/V	-0,56	0,35	62,29
	P13-P5/V	-30,12	1,00	3,33
	MOYENNE	19,11	0,70	15,54
MOYENNE	19,73	0,63	10,30	

B. Discussion

L'étude de la répétabilité a été effectuée sur des images relues. Les écarts-types seraient peut-être bien plus élevés sur un relevé d'images vierges. Cependant, les relevés considérés comme « définitifs » et qui servent à calculer les paramètres morphométriques ne proviennent que d'images qui ont été relues, dans mon cas, de nombreuses fois. De plus les images ayant servi à cette étude sont d'une qualité moyenne. La répétabilité des relevés sur ces images est donc représentative de la variabilité des relevés que j'ai effectués sur l'ensemble des images de l'étude sur les poulains. Elle ne peut pas, à mon avis, être extrapolée à d'autres opérateurs. Ayant relu les relevés d'une autre opératrice, j'ai pu remarquer que nous n'avions pas tendance aux mêmes erreurs et que nous n'avions pas les mêmes dérives.

1. Coordonnées des repères anatomiques

L'écart-type moyen de l'ensemble des repères anatomiques est faible (0,32 cm). Les repères anatomiques avec de grands écarts-types sont inégalement répartis. Cela explique les différences d'écart-type entre les images IR-Ant et IR-Post et la différence d'écart-type des coordonnées en x par rapport à celle en y et en z.

Des écarts-types élevés sont d'abord le reflet de difficultés lors du relevé de certains repères anatomiques : le coude, l'épaule, la rotule, la tubérosité tibiale et, ici sur un poulain de 18 mois, le garrot et le creux du dos. En revanche, le tuber coxae qui a posé de nombreux problèmes lors des relevés présente des écarts-types faibles. Ceci peut s'expliquer par le soin particulier dont il a fait l'objet et aussi, du fait de sa faible visibilité, d'une sorte de « normalisation » de sa localisation. Le fait que ses écarts-types soient différents entre les images IR-Ant et IR-Post s'explique par la différence de position du cheval. A la différence des IR-Ant, sur les IR-Post, le membre postérieur droit est à l'appui, ce qui met le tuber coxae droit plus en évidence. Le tuber coxae est donc plus visible et son relevé est moins variable.

Les repères anatomiques les plus faciles à relever ont des écarts-types très faibles : le sommet de la tête et les repères anatomiques normalisés de la base de l'encolure et du passage de sangle. Mais la base de la tête, a priori facile à relever, a un écart-type moyen de valeur

intermédiaire. De même, le tuber sacrale, a priori facile à relever, a un écart-type élevé en y sur les IR-Ant. Cela s'explique vraisemblablement par un manque de précision de ma part, spécifique à ces repères.

La plupart des repères anatomiques des membres distaux ont des écarts-types très faibles voire nuls. Cela s'explique par le fait que ces repères précédemment bien placés n'ont pas ou peu eu besoin d'être repositionnés.

2. Paramètres morphométriques

L'écart-type d'un paramètre morphométrique direct dépend des écarts-types des coordonnées 3-D des repères anatomiques qui le composent.

a-Distances

La moyenne des écarts-types des hauteurs est plus petite que celle des longueurs et des largeurs. Une hauteur n'est définie que par un seul repère anatomique tandis que les longueurs sont définies par deux repères anatomiques et que les largeurs sont définies par un repère anatomique et un plan lui-même défini par trois repères. Or la cause de variabilité d'un paramètre morphométrique direct est la variabilité des coordonnées 3-D des repères anatomiques qui le définissent. Cela explique que les hauteurs aient des écarts-types plus petits que les longueurs ou que les largeurs.

1- Hauteurs

L'écart-type d'une hauteur est égal à l'écart-type de la coordonnée en z du repère anatomique qui la définit. Quatre repères anatomiques présentent des écarts-types en z bien plus grand que les autres : le coude (A6), l'articulation tarso-métatarsienne (P4), la tubérosité tibiale (P13) et la rotule (P7). Les coefficients de variation restent néanmoins raisonnables (< 2%).

2- Longueurs

Les distances verticales (ou horizontales) dépendent des coordonnées en z (ou en x) des deux repères anatomiques qui les composent. L'écart-type d'une longueur dépend des écarts-types des coordonnées 3-D des deux repères anatomiques qui la composent. Une longueur dont la composante principale dans l'espace est horizontale (en x) aura un écart-type fortement lié aux écarts-types en x (les plus grands en moyenne) des repères anatomiques qui la définissent. De même, une longueur dont la composante principale dans l'espace est verticale (en z) aura un écart-type fortement lié aux écarts-types en z (les plus petits en moyenne) des repères anatomiques qui la composent.

Les longueurs définies de deux repères anatomiques avec des écarts-types M très faibles ont donc un écart-type très faible. C'est le cas des longueurs de la main et du doigt postérieur.

Certains repères anatomiques ont des écarts-types en x particulièrement plus grands que ceux des autres repères : le garrot (A8 et P12), la base de la tête (T2) et le creux du dos (A9). Ces repères très variables en x entrent dans la définition de distances horizontales et de longueurs dont la composante principale dans l'espace est horizontale. Ces distances ont donc des écarts-types plus élevés que les autres, particulièrement celles qui sont définies par deux de ces repères anatomiques. Ces distances ont néanmoins un CV raisonnable, excepté la distance entre le garrot et le creux du dos (A8→A9 : $\sigma = 4,09$ cm, CV = 18,82%) qui a une moyenne très petite. La question de l'exploitation de paramètres morphométriques avec une telle variabilité doit alors être posée.

Le coude (A6) a un écart-type en z particulièrement plus grand que ceux des autres repères. Ce repère très variable en z définit deux longueurs dont la composante principale dans l'espace est verticale (A3→A6 et A5→A6) et une distance verticale (D vert A12→A6). Les écarts-types et les coefficients de variation des longueurs sont élevés mais restent raisonnables ($\sigma = 1,57-1,58$ cm et CV = 2-5%). En revanche, D vert A12→A6 a un écart-type plus faible (0,96 cm) mais cette distance est extrêmement petite. Son coefficient de variation est donc extrêmement grand (61,45%). La question de l'exploitation de paramètres morphométriques avec une telle variabilité doit alors être posée. Dans une moindre mesure, l'articulation tarso-métatarsienne (P4) a un écart-type en z plus grand que ceux des autres

repères. Ce repère anatomique entre dans la définition de deux distances verticales et de deux longueurs à composante principalement verticale. Moins variable en z que le coude, ce repère entraîne des écarts-types plus petits sur ces distances (0,67-0,83 cm). Néanmoins ces dernières sont plus petites, alors leurs coefficients de variation sont du même ordre que ceux des longueurs du coude.

Ces deux tendances se retrouvent dans une moindre mesure pour de nombreux autres repères anatomiques qui ont des écarts-types en x ou/et en z de valeur intermédiaire. Les distances qu'ils définissent ont des écarts-types moyens. Pour ces distances et les autres, elles ne posent des problèmes que si elles sont particulièrement petites, comme c'est le cas pour la distance horizontale entre la pointe du jarret et la pointe de la fesse (D horiz P6→P9 = 0,52 cm) qui, malgré un écart-type faible (0,12 cm), a un coefficient de variation extrêmement élevé (23,52%).

3- Largeurs

Les largeurs sont définies comme le double de la distance entre le repère anatomique et sa projection sur le plan médian du cheval. Le plan médian est défini sur les IR-Ant par trois repères anatomiques (A8, A9 et A10) et sur les IR-Post, il est défini comme le plan perpendiculaire au sol passant par deux repères anatomiques (P11 et P12). L'écart-type d'une largeur dépend donc de l'écart-type de la coordonnée en y du repère anatomique qui le compose et des variations de position du plan médian du cheval qui dépendent des variations des repères anatomiques qui le définissent. Les largeurs comprennent donc de nombreuses sources de variabilité, mais la principale est l'écart-type en y du repère anatomique qui la définit.

Si l'écart-type en y du repère anatomique qui définit une largeur est très faible comme c'est le cas pour l'articulation de la hanche (P8 : $\sigma = 0,01$ cm) et pour le tuber coxae (P10 : $\sigma = 0,02$ cm), l'écart-type de la largeur est plus grand mais reste faible ($\sigma = 0,24-0,36$ cm). Si l'écart-type en y du repère anatomique qui définit une largeur présente une valeur intermédiaire comme c'est le cas pour l'épaule (A7 : $\sigma = 0,53$ cm), l'écart-type de la largeur est bien plus élevé (3,06 cm) et le coefficient de variation est élevé (6,41%). Une largeur ne permet que peu de variabilité en y du repère anatomique qui la définit.

b-Angles

L'écart-type d'un angle 3-D dépend des écarts-types des trois repères anatomiques qui le composent et de la longueur du ou des segments qui le composent.

1- Angles articulaires

Un écart-type plus élevé que les autres s'explique soit par un écart-type M particulièrement élevé d'un ou de plusieurs repères (A8 et A9) qui définissent l'angle, soit par un écart-type moyen ou élevé de tous les repères anatomiques qui définissent l'angle. Quel que soit le cas, les écarts-types restent très raisonnables ($<2,7^\circ$) et les coefficients de variation également ($<2\%$), excepté pour l'angle de l'articulation de la hanche qui a un écart-type de valeur intermédiaire mais une valeur moyenne tellement faible que son coefficient de variation est extrêmement élevé. Ce paramètre morphométrique est trop variable pour être exploité.

2- Les angles de certains segments par rapport à l'horizontale

L'écart-type de ces angles dépend de l'écart-type moyen des repères anatomiques qui les définissent mais aussi essentiellement de l'écart-type en x de ces repères. Or la moyenne de tous les écarts-types en x est plus élevée que celle des écarts-types en y, ce qui explique que ces angles ont un écart-type plus grand que ceux de l'orientation des rayons osseux des membres par rapport à la verticale. Les angles qui ont des écarts-types particulièrement élevés ($\sigma > 1^\circ$) sont définis par des repères anatomiques qui ont un écart-type en x et un écart-type M élevés ou de valeur intermédiaire (A6, A7, A8, P7, P13). Deux angles du membre antérieur sont définis uniquement par ce type de repères anatomiques (A6-A7/H et A7-A8/H). Ils ont des écarts-types particulièrement élevés ($1,64-2,63^\circ$) et des coefficients de variation qui sont particulièrement élevés également mais qui restent raisonnables (CV = 3,05-5,37%). La présence de ces deux angles parmi les trois angles du membre antérieur explique la différence d'écart-type moyen entre les angles du membre antérieur et ceux du membre postérieur.

3- L'orientation des rayons osseux des membres par rapport à la verticale

L'écart-type de ces angles dépend essentiellement des écarts-types en y et en z (les moins grands en moyenne) des repères anatomiques qui les définissent. Ces angles ont un écart-type faible en général. Seuls trois angles ont un écart-type $> 1^\circ$. Cependant, les coefficients de variation de ces angles sont $>2\%$ pour la plupart car les moyennes sont souvent très petites. Ces angles sont donc petits et ne permettent que très peu de variabilité des repères anatomiques qui le définissent.

L'orientation du canon postérieur par rapport à la verticale (P4-P3/V) a un écart-type moyen ($\sigma : 0,72^\circ$) mais une moyenne petite ($2,55^\circ$). Cet angle a donc un coefficient de variation extrêmement élevé (CV = 28,26%). L'orientation du segment pointe de la fesse-pointe du jarret (P9-P6/V) a un écart-type faible ($\sigma : 0,35^\circ$) mais une moyenne très petite ($0,56^\circ$) ce qui lui donne un écart-type extrêmement élevé (CV = 63,29%). La principale difficulté d'obtenir un coefficient de variation raisonnable est le petit ordre de grandeur de ces angles.

Conclusion

Cette méthode de mesure morphométrique en 3-D permet d'obtenir une bonne justesse. L'erreur inhérente au système de mesure pour le positionnement d'un point dans l'espace calibré est de 0,55 cm et elle est répartie de manière homogène dans cet espace. De plus, utiliser une position de référence au pas et non au placer ne provoque aucune différence significative sur les moyennes des mesures mais permet de diviser leur variabilité jusqu'à un facteur 4. L'absence de marqueur qui permet de gagner énormément de temps à l'enregistrement, ne modifie pas de manière significative les mesures. Cette méthode est au moins aussi juste et bien plus fidèle que les méthodes photométriques.

Cependant la précision de cette méthode dépend également de l'opérateur chargé d'identifier et de positionner les repères anatomiques sur les images de référence. Comme j'ai effectué ce travail, j'ai étudié ma répétabilité en tant qu'opératrice sur des images relues (n=5), représentatives de l'ensemble des images de référence. La moyenne des écarts-types

des coordonnées des repères anatomiques est faible (0,32 cm). Les écarts-types des repères anatomiques varient en fonction de :

- la facilité de relevé : certains repères anatomiques sont plus visibles que d'autres,
- l'aptitude de l'opérateur : certaines localisations ou certaines normes peuvent être mieux maîtrisées que d'autres,
- la qualité du relevé précédent et de ce fait chaque relecture, même non définitive, est importante.

De la variabilité des coordonnées des repères anatomiques dépendra la variabilité des paramètres morphométriques. C'est pourquoi, certains repères anatomiques méritent plus d'attention que d'autres :

- les repères anatomiques difficiles qui définissent des paramètres morphométriques importants (ex : rotule)
- les repères anatomiques qui entrent dans la définition de nombreux paramètres (ex : garrot)
- les repères anatomiques qui définissent des paramètres morphométriques de petite valeur et qui nécessitent, de ce fait, une faible variabilité (ex pour les aplombs: les angles de certains segments par rapport à la verticale).
- les repères anatomiques dont la variabilité est multipliée pour certains paramètres morphométriques (ex : largeurs) qu'ils définissent.

Le relevé est un travail long et laborieux, qui demande application et précision. Afin de limiter, pour l'opérateur, le risque d'erreur et de découragement qui peut diminuer son application, il peut être nécessaire de hiérarchiser l'importance des tâches avec lui, en fonction de ses propres difficultés et des paramètres morphométriques importants.

Conclusion générale

Cette méthode en 3-D apporte de nombreux progrès dans la mesure quantitative de la conformation du cheval. D'abord, elle est abordable aussi bien financièrement que techniquement. Elle est facile à transporter et à mettre en place sur le terrain. Les enregistrements sont rapides et peu contraignants pour les chevaux et pour les cavaliers. Elle permet de mesurer de grands effectifs de chevaux là où ils se trouvent, que ce soit des athlètes sur les terrains de concours, ou bien des poulains chez leurs éleveurs. C'est surtout une méthode de mesure fiable. L'une de ses particularités essentielles - mesurer le cheval au pas et non au galop - permet de s'affranchir du principal défaut des autres méthodes : la variabilité de la position du cheval, principale source de variabilité des mesures. De plus, à la différence de nombreuses autres méthodes, sa précision a été évaluée. Cette méthode est juste et fidèle. Elle a les moyens de répondre aux objectifs ambitieux pour lesquels elle a été conçue : fournir les bases scientifiques d'un programme de sélection rationnel pour ce qui a trait au « modèle » : héritabilité, relations conformation/performance et conformation/longévité.

La principale difficulté de cette méthode est le relevé des repères anatomiques sur les images de référence. C'est l'étape la plus longue et la plus fastidieuse. Elle peut surtout être la principale source de variabilité des mesures. C'est donc l'étape à laquelle on doit apporter le plus de soin. Cela passe par la formation de l'opérateur, mais aussi et surtout par ses conditions de travail. Celles-ci peuvent être améliorées par des aménagements du logiciel de relevé. L'étude sur la répétabilité des mesures a également mis en évidence la nécessité d'une hiérarchisation des tâches. La gestion technique et humaine de cette étape doit donc être considérée sérieusement si l'on veut des résultats d'une qualité optimale.

Cette méthode de mesure 3-D a pour vocation d'être mise à disposition d'autres équipes. Au-delà du concept intéressant, les résultats obtenus sont prometteurs. L'étude préliminaire a permis de démontrer la faisabilité d'une analyse des corrélations morphologie-performance grâce à la méthode de mesure 3D : des différences significatives de morphologie ont été démontrées entre 20 chevaux de niveau international en CSO et 20 chevaux de classe

D. L'étude sur 1430 jeunes chevaux a permis de déterminer l'héritabilité d'un dizaine de traits morphologiques et de calculer, pour ces traits, les indices génétiques d'une trentaine d'étalons. Les résultats de l'étude à laquelle j'ai participé sur le suivi longitudinal de la conformation des poulains avec la croissance sont en cours d'analyse. Ils devraient bientôt être disponibles.

Références bibliographiques

ANDERSON TM, McILWRAITH CW. (2004) Longitudinal development of equine conformation from weanling to age 3 years in the thoroughbred. *Equine vet. J.*, **36**(7), 563-570.

ANDERSON TM, McILWRAITH CW, DOUAY P. (2004) The role of conformation in musculoskeletal problems in the racing Thoroughbred. *Equine vet. J.*, **36**(7), 571-575.

BAILEY DG. (1995) Pixel calibration techniques. *In : Proceedings. of the New Zealand Image and Vision Computing '95 Workshop.*, Lincoln, Canterbury, Aug. 28-29, 37-42.

BELLOY E, BATHE AP. (1996) The importance of standardising the evaluation of conformation in the horse. *Equine vet. J.*, **28**(6), 429-430.

CREVIER-DENOIX N, ERLINGER D, TAVERNIER L *et al.* (2004) Correlations morphologie-Aptitude sportive : étude préliminaire sur un effectif de 20 chevaux de niveau international en CSO et 20 chevaux de classe D. *In : 30^{ème} journée de la Recherche Equine.* 3 Mars 2004, 1-13.

CREVIER-DENOIX N., POURCELOT P., RICARD A. (2006) Programme "Morphométrie 3-D" : Résultats obtenus, Perspectives d'utilisation. Rapport de fin de projet remis à l'Association Nationale du Selle Français, 54 p.

HOLMSTRÖM M, MAGNUSSON LE, PHILIPSSON J. (1990) Variation in conformation of Swedish Warmblood horses and conformational characteristics of elite sport horses. *Equine vet. J.*, **22**(3), 186-193.

HOLMSTRÖM M., PHILIPSSON J. (1993) Relationship between conformation, performance and health in 4-years-old Swedish Warmblood Riding Horses. *Livprodsci*, **33**, 293-312.

HUNT WF, THOMAS VG, STIEFEL W. (1999) Analysis of video-recorded images to determine linear and angular dimensions in the growing horse. *Equine vet. J.*, **31**(5), 402-410.

KOENEN EPC, VAN VELDHUISEN AE, BRASCAMP EW. (1995) Genetic parameters of linear scored conformation traits and their relation to dressage and show-jumping performance in the Dutch Warmblood Riding Horse population. *Livprodsci*, **43**, 85-94.

LACROIX V. (1999) Mise au point d'un protocole d'analyse morphométrique du cheval. Mémoire DEA, Université de Paris Sud.

LANGLOIS B, FROIDEVAUX J, LAMARCHE L. (1978) Analyse des liaisons entre la morphologie et l'aptitude au galop au trot et au saut d'obstacles chez le cheval. *Ann. Génét. Sél. Anim.*, **10** (3), 443-474.

MAGNUSSON LE. (1985a) *Studies on the conformation and related traits of standardbred trotters in Sweden. I. An objective method for measuring the equine conformation.* Thèse, SLU, Skara.

MAGNUSSON LE. (1985b) *Studies on the conformation and related traits of standardbred trotters in Sweden. V. Relationship between the conformation and performance of 4-years old Standardbred trotters.* Thèse, SLU, Skara.

MAWDSLEY A, KELLY EP, SMITH FH, BROPHY PO. (1996) Linear assessment of the Thoroughbred horse : an approach to conformation evaluation. *Equine vet. J.*, **28**(6), 461-467.

POURCELOT P, AUDIGIE F, DEGUEURCE C *et al.* (2000) A method to synchronise cameras using the direct linear transformation technique. *In : Journal of Biomechanics*, **33**, 1751-1754.

POURCELOT P, AUDIGIE F, LACROIX V *et al.* (2002) Suivi des paramètres morphométriques et des aplombs du cheval : une méthode 3D. *In : 28^{ème} journée de la Recherche Equin.* 27 Février 2002, 137-148.

VAN WEEREN P.R, CREVIER-DENOIX N. (2006) Equine conformation : clues to performance and soundness? *Equine vet. J.*, **38**(6), 591-596.

WALLIN L, STRANBERG e, PHILIPSSON J. (2001) Phenotypic relationship between test result of Swedish Warmblood horses as 4-year-olds and longevity. *Livprodsci*, **68**, 97-105.

WIKIPEDIA. *Wikipédia, L'encyclopédie libre. [en-ligne]*. Mise à jour le 4 Décembre 2006 [<http://www.fr.wikipedia.org>], (consulté le 14 Décembre 2006).

Annexes

Annexe 1 : Résultat de l'étude de la répétabilité sur les coordonnées 3-D des repères anatomiques.

I/ Repères anatomiques du membre antérieur

	Repère A1 : Pied			Repère A2 : Couronne			Repère A3 : Boulet			Repère A4 : Art. carpo-métacarpienne			Repère A5 : Extrémité distale du radius			Repère A6 : Coude		
Dates	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
27/01/2006	195,12	54,30	-1,03	189,03	54,34	5,99	180,47	55,32	15,89	181,92	55,31	38,22	183,13	55,20	50,75	186,78	49,63	81,00
01/02/2006	195,12	54,30	-1,03	189,03	54,34	5,99	180,47	55,32	15,89	181,92	55,31	38,22	183,13	55,20	50,75	186,78	49,63	81,00
09/02/2006	195,12	54,30	-1,03	189,03	54,34	5,99	180,47	55,32	15,89	181,92	55,31	38,22	183,13	55,20	50,75	186,19	49,64	82,10
10/02/2006	195,12	54,30	-1,03	189,03	54,34	5,99	180,47	55,06	15,90	181,92	55,06	38,23	182,78	55,04	50,74	185,57	49,66	83,97
11/02/2006	195,12	54,30	-1,03	189,03	54,34	5,99	180,47	55,32	15,89	181,92	55,31	38,22	183,13	55,20	50,75	186,67	49,42	84,40
MOYENNES	195,12	54,30	-1,03	189,03	54,34	5,99	180,47	55,27	15,89	181,92	55,26	38,22	183,06	55,17	50,75	186,40	49,60	82,49
Ecart-types	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	0,01	0,00	0,11	0,01	0,16	0,07	0,00	0,52	0,10	1,62
CV (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,21	0,04	0,00	0,21	0,01	0,09	0,13	0,00	0,28	0,20	1,96

	Repère A7 : Pointe de l'épaule			Repère A8 : Garrot			Repère A9 : Creux du dos			Repère A10 : Tuber Sacrale			Repère A11 : Tuber coxae			Repère A12 : Passage de sangle		
Dates	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
27/01/2006	204,96	41,89	110,04	171,84	62,91	153,38	153,44	62,08	147,94	97,54	56,80	150,22	109,79	38,76	140,94	168,85	63,74	83,54
01/02/2006	205,61	40,71	110,33	168,98	62,91	153,03	153,44	62,08	147,94	97,54	56,80	150,22	109,79	38,76	140,94	168,85	63,74	83,54
09/02/2006	204,96	41,89	110,04	175,47	60,45	153,38	154,15	60,91	147,92	97,67	58,25	150,26	109,79	38,76	140,94	168,85	63,74	83,54
10/02/2006	204,96	41,89	110,04	176,41	63,15	153,40	150,47	62,98	147,17	97,54	56,80	150,22	110,75	38,30	140,39	168,85	63,74	83,54
11/02/2006	203,60	41,29	110,05	175,02	62,01	152,85	151,16	61,83	147,45	98,81	58,00	150,11	110,20	38,18	140,16	168,85	63,74	83,54
MOYENNES	204,82	41,53	110,10	173,54	62,29	153,21	152,53	61,98	147,68	97,82	57,33	150,21	110,07	38,55	140,67	168,85	63,74	83,54
Ecart-types	0,73	0,53	0,13	3,07	1,11	0,25	1,61	0,74	0,36	0,56	0,73	0,06	0,42	0,29	0,37	0,00	0,00	0,00
CV (%)	0,36	1,27	0,12	1,77	1,79	0,16	1,06	1,19	0,24	0,57	1,28	0,04	0,38	0,75	0,27	0,00	0,00	0,00

II/ Repères anatomiques de la tête et de l'encolure

Dates	Repère T1 : Sommet de la tête			Repère T2 : Base de la tête			Repère T3 : Base de l'encolure		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
27/01/2006	280,73	65,86	87,98	270,52	67,00	146,14	203,24	63,40	126,02
01/02/2006	280,73	65,86	87,98	275,27	67,07	144,80	203,24	63,40	126,02
09/02/2006	280,73	65,86	87,98	272,36	67,20	145,83	203,24	63,40	126,02
10/02/2006	280,73	65,86	87,98	271,80	67,22	145,94	203,24	63,40	126,02
11/02/2006	280,75	66,09	87,97	271,27	67,25	145,78	203,26	63,90	126,02
MOYENNES	280,74	65,90	87,98	272,24	67,15	145,70	203,24	63,50	126,02
Ecart-types	0,01	0,11	0,00	1,82	0,11	0,52	0,01	0,23	0,00
CV (%)	0,00	0,16	0,00	0,67	0,16	0,36	0,00	0,36	0,00

III/ Repères anatomiques du membre postérieur

	Repère P1 : Pied			Repère P2 : Couronne			Repère P3 : Boulet			Repère P4 : Art. tarso-métatarsienne			Repère P5 : Extrémité distale du tibia			Repère P6 : Pointe du jarret			Repère P7 : Rotule		
Dates	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
27/01/2006	44,39	48,67	-1,29	38,41	48,77	5,93	29,50	49,55	15,97	28,70	48,87	43,03	34,01	47,65	57,19	22,22	47,20	62,90	57,70	42,10	98,05
01/02/2006	44,39	48,67	-1,29	38,41	48,77	5,93	29,50	49,55	15,97	28,70	48,87	43,03	34,01	47,65	57,19	22,22	47,20	62,90	57,70	42,10	98,05
09/02/2006	44,39	48,67	-1,29	38,41	48,77	5,93	29,50	49,55	15,97	28,63	48,89	44,63	34,21	47,73	57,19	22,22	47,20	62,90	57,70	42,10	98,05
10/02/2006	44,39	48,67	-1,29	38,41	48,77	5,93	30,04	49,57	15,96	28,34	48,93	43,14	34,01	47,65	57,19	22,22	47,20	62,90	57,67	42,11	98,99
11/02/2006	44,39	48,67	-1,29	38,41	48,77	5,93	29,50	49,55	15,97	28,68	48,88	43,14	35,09	47,69	57,18	22,18	47,22	63,66	56,59	43,07	98,02
MOYENNES	44,39	48,67	-1,29	38,41	48,77	5,93	29,61	49,56	15,97	28,61	48,88	43,39	34,26	47,68	57,19	22,21	47,20	63,05	57,47	42,30	98,23
Ecart-types	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,24	0,01	0,01	0,15	0,03	0,69	0,47	0,03	0,00	0,02	0,01	0,34	0,49	0,43	0,43
CV (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,82	0,02	0,05	0,54	0,05	1,60	1,38	0,07	0,01	0,09	0,01	0,54	0,85	1,02	0,43

	Repère P8 : Art. de la hanche			Repère P9 : Pointe de la fesse			Repère P10 : Tuber coxae			Repère P11 : Tuber Sacrale			Repère P12 : Garrot			Repère P13 : Tubérosité tibiale		
Dates	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
27/01/2006	42,81	44,20	138,17	22,68	47,02	133,20	73,10	39,45	145,48	58,05	58,16	155,07	136,35	66,83	149,16	51,44	43,53	87,34
01/02/2006	42,81	44,20	138,17	22,68	47,02	133,20	73,10	39,45	145,48	58,05	58,16	155,07	134,30	66,91	149,19	51,44	43,53	87,34
09/02/2006	42,81	44,20	138,17	22,68	47,02	133,20	73,10	39,45	145,48	58,06	58,16	154,89	138,97	66,48	149,11	51,50	43,54	87,34
10/02/2006	42,81	44,20	138,17	22,68	47,02	133,20	73,10	39,45	145,48	58,05	58,16	155,07	141,66	66,15	149,47	51,49	43,53	87,98
11/02/2006	42,83	44,18	137,89	22,91	48,46	133,23	73,12	39,41	144,99	59,83	58,10	155,05	139,17	66,84	149,11	50,38	44,40	86,15
MOYENNES	42,81	44,19	138,12	22,73	47,31	133,20	73,10	39,44	145,38	58,41	58,15	155,03	138,09	66,64	149,21	51,50	43,68	87,26
Ecart-types	0,01	0,01	0,12	0,10	0,64	0,02	0,01	0,02	0,22	0,80	0,03	0,08	2,83	0,32	0,15	0,74	0,35	0,60
CV (%)	0,03	0,02	0,09	0,45	1,36	0,01	0,01	0,04	0,15	1,36	0,05	0,05	2,05	0,49	0,10	1,44	0,80	0,68

Annexe 2 : Résultat de l'étude de la répétabilité sur les paramètres morphométriques.

1/ Hauteurs

IR-Ant

	Moyenne (cm)	Ecart-type (cm)	Coefficient de variation (%)
A 03	15,89	0,01	0,04
A 04	38,22	0,01	0,01
A 05	50,75	0,00	0,00
A 06	82,49	1,62	1,96
A 07	110,10	0,13	0,12
A 08	153,21	0,25	0,16
A 09	147,68	0,36	0,24
A 10	150,21	0,06	0,04
A 12	83,54	0,00	0,00
T 03	126,02	0,00	0,00
MOYENNE	92,45	0,27	0,29

IR-Post

	Moyenne (cm)	Ecart-type (cm)	Coefficient de variation (%)
P 03	15,97	0,01	0,05
P 04	43,39	0,69	1,60
P 05	57,19	0,00	0,01
P 06	63,05	0,34	0,54
P 07	98,23	0,43	0,43
P 08	138,12	0,12	0,09
P 09	133,20	0,02	0,01
P 10	145,38	0,22	0,15
P 11	155,03	0,08	0,05
P 12	149,21	0,15	0,10
P 13	87,23	0,66	0,76
MOYENNE	98,73	0,25	0,34

2/Longueurs

IR-Ant

	Moyenne (cm)	Ecart-type (cm)	Coefficient de variation (%)
A1 -> A3	22,40	0,00	0,01
A1 -> A2	9,30	0,00	0,00
A2 -> A3	13,12	0,00	0,01
A3 -> A4	22,38	0,00	0,01
A3 -> A5	34,96	0,02	0,06
A3 -> A6	67,11	1,58	2,35
A4 -> A5	12,58	0,02	0,16
A4 -> A6	44,86	1,57	3,50
A5 -> A6	32,41	1,57	4,85
A6 -> A7	34,17	1,63	4,77
A6 -> A8	73,05	2,17	2,97
A7 -> A8	57,23	2,18	3,81
A8 -> A9	21,75	4,09	18,82
A8 -> A10	75,96	2,91	3,83
A9 -> A10	54,98	1,87	3,40
A10 -> A11	24,38	0,62	2,55
D horiz A11 -> A8	63,48	2,82	4,44
D horiz A11 -> A12	58,78	0,42	0,72
D vert A9 -> A12	64,15	0,36	0,56
D vert A8 -> A12	69,67	0,25	0,36
D vert A12 - > A6	1,56	0,96	61,45
MOYENNE	40,87	1,19	5,65
T1 -> T2	58,38	0,75	1,29
T2 -> T3	71,85	1,63	2,26
T2 -> A8	99,11	4,40	4,44
MOYENNE	85,48	3,01	3,35

IR-Post

	Moyenne (cm)	Ecart-type (cm)	Coefficient de variation (%)
P1 -> P3	22,74	0,16	0,71
P1 -> P2	9,37	0,00	0,00
P2 -> P3	13,37	0,16	1,22
P3 -> P4	27,45	0,69	2,51
P3 -> P6	47,72	0,33	0,69
P4 -> P5	14,96	0,67	4,48
P4 -> P6	20,74	0,80	3,84
P5 -> P6	13,41	0,59	4,41
P5 -> P13	34,74	1,05	3,02
P5 -> P7	47,46	0,70	1,48
P6 -> P13	37,96	1,00	2,65
P6 -> P7	50,05	0,75	1,50
P6 -> P9	70,16	0,32	0,45
P13 -> P8	51,59	0,48	0,92
P13 -> P10	62,27	0,62	0,99
P7 -> P13	12,72	0,43	3,36
P7 -> P8	42,54	0,43	1,02
P7 -> P10	49,76	0,40	0,79
P8 -> P9	20,92	0,01	0,04
P9 -> P10	52,42	0,04	0,08
P10 -> P11	25,68	0,36	1,40
P11 -> P12	80,35	2,71	3,37
D vert P3 -> P4	27,43	0,69	2,53
D vert P4 -> P6	19,65	0,83	4,24
D vert P3 -> P6	47,08	0,34	0,72
D horiz P2 -> P9	15,68	0,10	0,65
D horiz P3 -> P9	6,88	0,29	4,16
D horiz P6 -> P9	0,52	0,12	23,52
D horiz P8 -> P9	20,08	0,09	0,46
MOYENNE	32,61	0,52	2,59

3/Largeurs

	Moyenne (cm)	Ecart- type (cm)	Coefficient de variation (%)
Largeur A7	47,77	3,06	6,41
Largeur P8	24,44	0,36	1,48
Largeur P10	40,32	0,24	0,60
MOYENNE	37,51	1,22	2,83

4/Angles articulaires

		Moyenne (degrés)	Ecart-type (degrés)	Coefficient de variation (%)
Membre antérieur	A6-A7-A8	103,28	2,28	2,21
	A5-A6-A7	152,63	2,62	1,72
	A4-A5-A6	189,55	0,40	0,21
	A3-A4-A5	181,52	0,72	0,40
	A3-A4 / A5-A6	190,20	0,67	0,35
	A2-A3-A4	135,30	0,05	0,04
	A1-A3-A4	135,35	0,02	0,02
	A1-A2-A3	183,78	0,50	0,27
	A8-A9-A10	161,85	1,71	1,06
	MOYENNE	159,27	1,00	0,70
Membre postérieur	P8-P9-P10	0,15	1,09	723,29
	P7-P8 / P9-P10	83,12	0,51	0,61
	P13-P8 / P9-P10	94,05	0,45	0,48
	P5-P7-P8	129,60	1,74	1,34
	P5-P13-P8	140,55	1,67	1,19
	P4-P5-P7	172,61	2,66	1,54
	P4-P5-P13	172,61	2,62	1,52
	P3-P4-P5	155,42	1,99	1,28
	P3-P4 / P5-P7	148,10	1,33	0,90
	P3-P4 / P5-P13	148,11	1,33	0,90
	P3-P4 / P6-P7	132,75	0,52	0,39
	P3-P4 / P6-P13	127,63	0,68	0,53
	P3-P5-P7	156,71	1,73	1,10
	P3-P5-P13	156,71	1,70	1,08
	P2-P3-P4	140,59	1,59	1,13
	P2-P3-P5	131,98	1,42	1,08
	P1-P3-P4	141,36	1,29	0,91
	P1-P2-P3	176,68	0,18	0,10
	P9-P10 / P11-P12	156,96	0,60	0,38
	P7-P8 / P11-P12	66,11	0,52	0,78
	P13-P8 / P11-P12	76,54	0,54	0,71
	P3-P4 / P6-P9	177,03	0,77	0,44
P10-P7-P5	168,44	1,77	1,05	
P5-P13 / P7-P8	129,61	1,70	1,31	
	MOYENNE	132,64	1,27	31,00
	MOYENNE	139,91	1,19	22,74

5/ Angles de certains segments par rapport à l'horizontale

		Moyenne (degrés)	Ecart-type (degrés)	Coefficient de variation (%)
Membre antérieur	A1-A3/H	49,05	0,02	0,05
	A6-A7/H	53,89	1,64	3,05
	A7-A8/H	49,01	2,63	5,37
	MOYENNE	50,65	1,43	2,82
Membre postérieur	P1-P3/H	49,38	0,45	0,92
	P2-P3/H	48,66	0,77	1,57
	P7-P6/H	44,66	0,34	0,77
	P7-P5/H	59,87	1,05	1,75
	P13-P6/H	39,56	0,70	1,77
	P13-P5/H	59,88	1,00	1,68
	P7-P8/H	69,67	0,72	1,03
	P13-P8/H	80,56	0,64	0,79
	P9-P10/H	13,44	0,26	1,90
	MOYENNE	51,74	0,66	1,35
MOYENNE		51,47	0,85	1,72