

Morphométrie 3D : un nouvel outil au service de l'élevage et de la sélection

Depuis 2002, l'UMR INRA-ENVA 957 de Biomécanique et pathologie locomotrice du cheval » (BPLC) mène, avec le soutien des Haras nationaux et en partenariat avec l'ANSF (association nationale du selle français), un programme de recherche en morphométrie 3D. Ce programme, qui s'intègre au programme d'élevage du cheval selle français, repose sur l'utilisation d'une méthode originale de mesure morphométrique.

LA MORPHOMÉTRIE : POURQUOI ET COMMENT ?

La conformation (le " modèle ") est un critère essentiel dans l'évaluation d'un cheval de sport ou de course, mais le simple examen visuel ne permet qu'une appréciation qualitative, qui est, en outre, par essence, subjective. Or, pour prendre en compte la conformation dans un programme de sélection, il faut pouvoir l'évaluer de façon objective et quantitative, par l'intermédiaire de mesures morphométriques. Par ailleurs, il faut être capable d'effectuer ces mesures sur un grand nombre de chevaux, les calculs d'héritabilité nécessitant de grands effectifs.

Il existe plusieurs types de méthodes de mesures morphométriques :

1) Les méthodes directes font appel à des instruments manipulés par un opérateur : toise, pied-à-coulisse, ruban, compas, ... (4,8). Elles sont peu précises, longues à mettre en œuvre, et leur usage ne peut être envisagé facilement sur de grands effectifs.

2) Avec les méthodes indirectes, les mesures ne sont pas effectuées sur le cheval lui-même. Jusqu'ici, ces mesures étaient réalisées à partir de photographies de chevaux munis de marqueurs (6,7,3,1). Toutefois, ces mesures, effectuées dans un plan (celui de la photographie), ne traduisent pas la réalité de la conformation qui est, par définition, tridimensionnelle. Par ailleurs, ce type de mesures suppose - outre une connaissance précise de l'anatomie du cheval, requise quelle que soit la méthode - un temps incompréhensible de préparation de l'animal lié à la pose des marqueurs, et son immobilité au moment de la prise du cliché. Le cheval doit donc être à l'arrêt, la position recherchée étant celle du « placer », qui est très variable, y compris sur un même individu.

C'est dans ce contexte qu'a été développée en 1999, au sein de l'UMR BPLC,

une méthode de mesure morphométrique dérivée des méthodes utilisées pour l'analyse cinématique de la locomotion du cheval. Cette méthode originale a pour particularités :

- d'être en 3 dimensions (→ fournit des longueurs et des angles réels, et non projetés dans un plan, cf. mesures faites sur photographies),

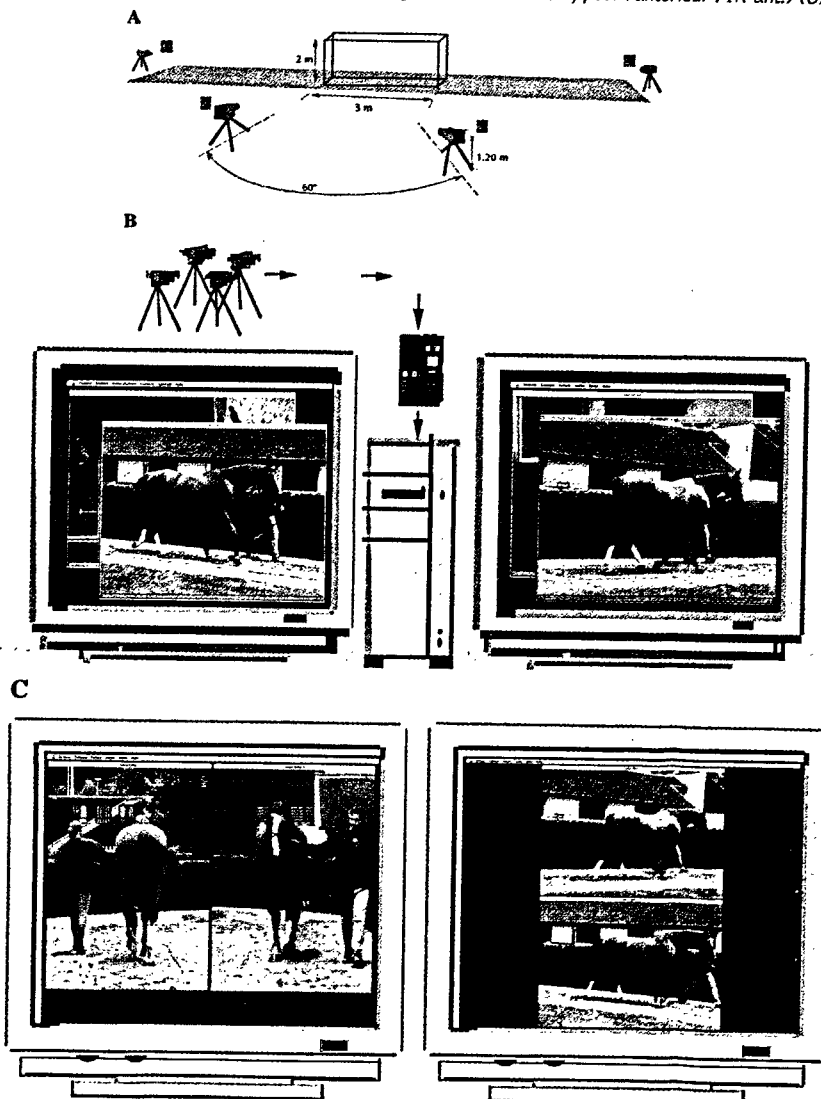
- de ne pas requérir l'utilisation de marqueurs cutanés (→ gain de temps, permet de travailler sur de grands effectifs),
- d'avoir pour support des enregistrements vidéo du cheval au pas et non au placer (→ accroît la reproductibilité des mesures, et facilite l'enregistrement de poulains, à qui il est généralement difficile d'imposer l'immobilité).

FIGURE 1 : ENREGISTREMENT ET TRAITEMENT DES FILMS.

Disposition des caméras et aire d'enregistrement (A)

Numérisation des 4 films, qui sont présentés sur 2 écrans séparés (B)

Synchronisation des 4 films et sélection des « images de référence » (ici, pour l'antérieur : IR-ant.) (C)



Cette méthode (morphométrie 3D) a été validée expérimentalement dans le cadre d'un DEA (5), et elle a fait l'objet de plusieurs présentations lors de congrès scientifiques (9,10).

En 2001, l'ANSF a souhaité inclure dans son programme d'élevage des mesures à large échelle permettant de caractériser la descendance des reproducteurs de façon descriptive, et de quantifier les paramètres essentiels à prendre en compte dans un schéma de sélection de la race. Pour l'évaluation quantitative du modèle, la méthode de morphométrie 3D a été retenue.

MÉTHODE DE MORPHOMÉTRIE 3D : PRINCIPES

Le protocole expérimental comprend 3 grandes étapes :

- l'enregistrement des chevaux ;
- le traitement des films et
- les mesures morphométriques proprement dites (relevés anatomiques, puis cal-

cul des paramètres morphométriques).

Protocole d'enregistrement (fig. 1)

Les chevaux sont filmés au pas, tenus en main, lors d'un aller et retour dans un couloir d'environ 10 m de long et 0,70 m de large (délimité par des cordelettes au sol). Quatre caméras numériques sont installées : une à chaque extrémité de la piste (filmant le cheval de face et de derrière), et deux sur l'un des côtés (filmant le cheval de profil), faisant entre elles un angle d'environ 60°. La calibration des caméras (enregistrement d'une structure de calibration par chacune d'elles) doit être effectuée avant le début des enregistrements.

Traitement des films (fig. 1)

Il comprend plusieurs étapes :

- numérisation des films sur ordinateur ;
- synchronisation des 4 films (issus des 4 caméras) relatifs à la même séquence d'enregistrement ;
- pour chaque cheval, sélection des

« images de référence » correspondant à la verticalité du canon antérieur / postérieur lors de l'appui (→ 2 séries de 4 images / cheval).

Mesures morphométriques (fig. 2)

Sur les images de référence (IR), relevé manuel de 28 repères anatomiques : 15 sur les IR-membre antérieur (IR-ant.), pour les régions tête-encolure, tronc et membre antérieur, et 13 sur les IR-membre postérieur (IR-post.), pour les régions membre postérieur et dos (3 repères sont communs aux 2 séries d'IR → relevé de 25 repères différents).

Puis calcul automatique des coordonnées en 3D de chaque repère. C'est à partir des coordonnées 3D des repères anatomiques que les paramètres morphométriques (environ 400) sont calculés de façon automatique par le logiciel.

Ces paramètres sont :

- les principales longueurs (des différents segments des membres et des bras de leviers), en valeur absolue et relative (ex. : rapports de 2 longueurs, longueurs rapportées à la taille au garrot) ;
- les principales largeurs (ex. : épaules, hanches) ;
- les principales hauteurs, en valeurs absolue et relative (hauteurs rapportées à la taille au garrot) ;
- les angles articulaires (angles réels et leurs projections dans les plans sagittal et frontal) ;
- les angles des segments par rapport à l'horizontale et à la verticale (angles réels et projetés dans les plans sagittal et frontal), ces 2 dernières catégories de paramètres permettent d'apprécier les aplombs de profil, de devant et de derrière.

ACTIONS MENÉES DANS LE CADRE DU PROGRAMME D'ÉLEVAGE DU CHEVAL SELLE FRANÇAIS

Trois actions ont été lancées en 2002.

Etude préliminaire

Objectifs, matériels et méthodes

Cette étude a eu pour objectif, sur un petit effectif de chevaux, de vérifier la faisabilité des enregistrements sur le terrain dans les conditions de la compétition (saut d'obstacles), de mettre en place les nécessaires adaptations du protocole et du logiciel de mesure morphométrique, et de définir les paramètres morphométriques à calculer. Le choix de l'effectif ▶

FIGURE 2 : RELEVÉ MANUEL DES REPÈRES ANATOMIQUES

- 15 repères sont relevés sur les images de référence de l'antérieur (IR ant.) : régions tête-encolure, tronc et membre antérieur (A),
 - 13 le sont sur les IR post. : régions membre postérieur et dos (B),
 - 3 repères (garrot, sommet de la croupe, angle de la hanche) sont communs aux 2 IR. En bas et au centre (C), série des 4 vues correspondant aux IR-ant. traitées.
- Dès qu'un même repère est relevé sur au moins 2 des 4 vues, ses coordonnées en 3D sont calculées et la position résultante de ce repère est affichée. Ceci permet à l'opérateur de contrôler la cohérence de son relevé (chaque carré, représentant un repère à relever, initialement jaune, devient rose sur la vue correspondante dès qu'il est manipulé ; dès qu'elle est calculée, la position 3D du repère s'affiche en bleu). Les différents paramètres morphométriques sont ensuite calculés de façon automatique, à partir des coordonnées 3D des 28 repères.



► (chevaux de classe D, d'une part ; de niveau international en CSO, d'autre part) a permis, par ailleurs, de comparer la morphologie de ces 2 populations, nettement différentes en termes d'aptitude sportive.

Cette étude et les résultats auxquels elle a abouti ont fait l'objet d'un article publié dans le cadre de la journée de la recherche équine en 2004 (2).

20 chevaux internationaux en CSO (groupe A, ISO moyen : 166 ± 10) et 20 chevaux de classe D (groupe B, ISO moyen : 101 ± 9) ont ainsi été filmés et mesurés en 2002.

Les 400 paramètres morphométriques calculés par le logiciel ont été comparés entre les 2 groupes en utilisant un test de Student. Dans un second temps, une recherche de corrélations, puis une analyse en composantes principales ont été effectuées sur les paramètres correspondant aux différences les plus significatives au test de Student ($P < 0,01$). Enfin, une analyse discriminante a été mise en oeuvre sur les paramètres ainsi triés.

Principaux résultats obtenus (fig 3)

Les traits morphologiques caractéristiques du groupe A par rapport au groupe B sont synthétisés ci-dessous.

• Hauteurs (fig 3A)

La plupart des reliefs osseux de l'arrière-main sont significativement plus hauts dans le groupe A (les différences correspondantes vont de 1,9 à 3,1 cm), et ceci alors que les tailles au garrot (TG) des 2 groupes ne sont pas significativement différentes.

Lorsque ces hauteurs sont rapportées à la TG, les différences entre les 2 groupes deviennent plus significatives encore.

• Longueurs (fig 3B)

Le bras, la croupe et la cuisse sont significativement plus longs dans l'effectif A (d'environ 2 cm). Là encore, les différences entre groupe A et groupe B sont plus significatives encore quand elles sont rapportées à la TG.

Le canon antérieur est légèrement plus long (longueur absolue et relative, rapportée à la TG), et l'avant-bras tend à être plus court (longueur relative). Il en résulte que le rapport avant-bras / canon antérieur est, de façon très significative ($P < 0,001$), plus petit dans l'effectif A. Le tronc est proportionnellement plus

FIGURE 3 : PRINCIPALES DIFFÉRENCES MORPHOLOGIQUES ENTRE UN GROUPE DE 20 CHEVAUX DE NIVEAU INTERNATIONAL EN CSO (GROUPE A) ET UN GROUPE DE 20 CHEVAUX DE CLASSE D (GROUPE B) : PRÉSENTATION SYNTHÉTIQUE DES RÉSULTATS.

Fig. 3A : les reliefs anatomiques de l'arrière-main sont significativement plus hauts dans le groupe A que dans le B ; la ligne du dessus est moins orientée « en montant » dans le groupe A.

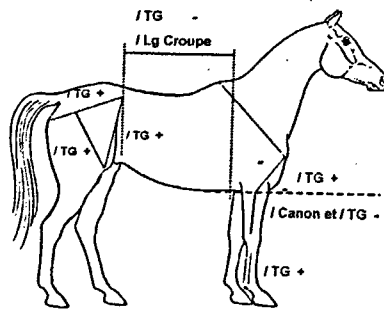
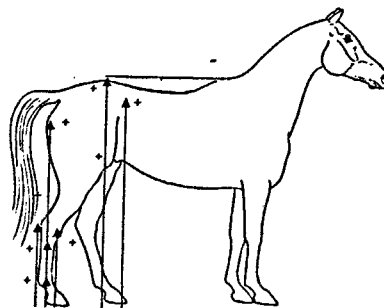


Fig. 3B : les rayons proximaux du membre postérieur (croupe, cuisse) et le bras, ainsi que le canon antérieur, sont significativement plus longs dans le groupe B ; l'inverse est observé pour l'avant-bras, ainsi que pour le tronc (plus brefs, en valeur relative, dans le groupe A). L'angle de l'épaule, ainsi que celui que fait le bras par rapport à l'horizontale, sont significativement plus faibles dans le groupe A.



bref dans le groupe A (différence significative lorsque la longueur du tronc est rapportée à la TG ou à la longueur de la croupe).

• Angles

L'angle de l'articulation de l'épaule est légèrement plus fermé (d'un peu plus de 3°) dans l'effectif A, et l'humérus (l'axe du bras), légèrement plus couché sur l'horizontale (fig 3B).

Conséquence d'une croupe plus haute dans l'effectif A, la ligne du dessus a tendance à être moins orientée « en montant » dans ce groupe par rapport au B (fig. 3A).

Une analyse discriminante utilisant 7 variables (paramètres morphométriques) a permis de discriminer correctement les chevaux dans 95 % des cas (2). Ces 7 variables correspondent, pour la plupart, à

des rapports de longueurs (ex : longueur de l'avant-bras / longueur du canon antérieur; hauteur du jarret / taille au garrot), donc à des proportions du corps.

Bien que sa portée statistique soit très limitée compte tenu du faible nombre de sujets, cette étude a mis en évidence des différences significatives entre les 2 groupes de chevaux, certaines d'entre elles étant très ténues, ce qui reflète la sensibilité de la méthode (plus petite différence significative : 0,6 cm pour les longueurs de rayons ; 1,9 cm pour les hauteurs ; $1,4^\circ$ pour les angles).

Etude à large échelle sur jeunes chevaux de 4 et 5 ans

Cette étude porte sur 750 jeunes chevaux selle français, sélectionnés à partir d'une population de 1 430 sujets filmés en 2002 (lors des épreuves du cycle classique 4 et 5 ans). Cette sélection a été opérée sur la base des ascendants des jeunes chevaux afin de pouvoir déterminer l'héritabilité des paramètres morphométriques, et caractériser sur le plan morphologique la descendance des étalons les mieux représentés dans cette population. 36 étalons, pères et/ou grands-pères des jeunes chevaux, ont également été enregistrés en 2003.

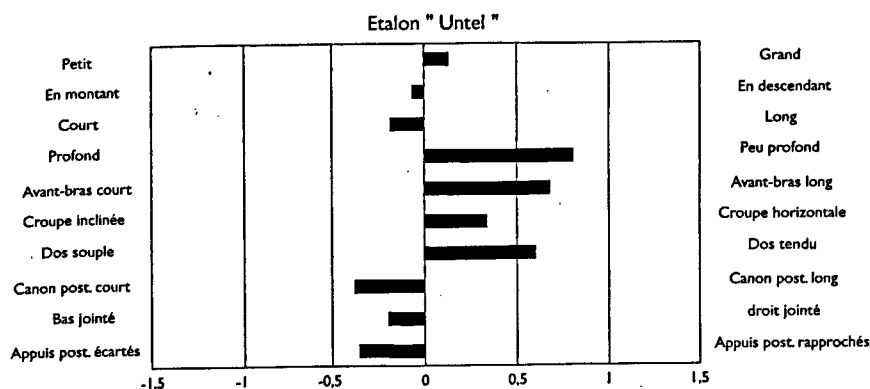
L'exploitation de cette base de données, effectuée en collaboration avec Anne Ricard (génétique quantitative, INRA Toulouse), a permis de déterminer l'héritabilité de grands traits de la morphologie d'un cheval, et de présenter les caractéristiques morphologiques de la production d'une trentaine d'étalons selle français.

Dix traits morphologiques sont apparus ainsi « très » ou « assez » héréditaires :

- Profondeur relative du thorax
Héritabilité = 0,53
- Longueur du tronc
Héritabilité = 0,47
- Axe du paturon (droit / bas jointé)
Héritabilité = 0,35
- Ensellement (dos tendu / dos souple)
Héritabilité = 0,34
- Longueur de l'avant-bras
Héritabilité = 0,32
- Longueur du canon postérieur
Héritabilité = 0,30
- Inclinaison de la croupe
Héritabilité = 0,28

FIGURE 4 : EXEMPLE DE REPRÉSENTATION DES INDICES D'UN ÉTALON DONNÉ, POUR LES 10 TRAITS MORPHOLOGIQUES TROUVÉS « TRÈS » OU « ASSEZ » HÉRITABLES.

Les indices sont exprimés en écart à la moyenne de la population (présenté ici en unité d'écart type).
Données Anne Ricard.



- Orientation de la ligne du dessus (fait « en montant » / « en descendant »)
Héritabilité = 0,27
- Format en hauteur
Héritabilité = 0,23
- Appuis postérieurs rapprochés / écartés
Héritabilité = 0,20

Connaissant l'héritabilité, il est possible d'estimer la façon dont les étalons les mieux représentés dans la population produisent pour ces traits morphologiques (exemple, fig. 4). Ces informations ont un intérêt immédiat pour les éleveurs en termes d'accouplements raisonnés. L'ensemble des résultats obtenus a été transmis à l'ANSF et aux Haras nationaux en octobre 2006.

Suivi longitudinal de la croissance et des aplombs chez le poulain

Le troisième volet des actions menées dans le cadre du programme d'élevage du cheval selle français est encore en cours. Il correspond au suivi longitudinal de la croissance et des aplombs entre 6 mois et 3 ans, avec pour finalité l'étude des corrélations entre morphologie du poulain et apparition ultérieure de lésions de l'appareil locomoteur (corrélations morphologie-longévité).

Pour cela, une cohorte constituée de 67 poulains a été filmée à 6 (automne 2002), 18 (automne 2003), et 36 mois (été 2005). Une deuxième cohorte de 42 poulains (filmés successivement à l'automne 2003 et 2004), a permis de compléter la base de données à 6 et 18 mois. Tous ces poulains ont été filmés chez

leurs éleveurs (soit une dizaine d'élevages, en Franche-Comté, Champagne-Ardenne, Val de Loire, Loire-Atlantique, Bretagne, Normandie), ce qui démontre la faisabilité des mesures dans les conditions du terrain.

CONCLUSION - PERSPECTIVES

Le programme de recherche en morphométrie 3D, mené depuis 2002 avec le soutien des Haras nationaux, a permis :

- de confirmer que la méthode développée est utilisable à large échelle, et que les enregistrements correspondants peuvent avoir lieu lors de compétitions ou dans les élevages, y compris sur des poulains ;
- de fournir une très grande variété de mesures (paramètres morphométriques), dont la plupart sont totalement inaccessibles par des méthodes directes ;
- de démontrer la sensibilité de la méthode 3D, qui a permis de mettre en évidence des différences ténues entre 2 groupes de chevaux (cf. étude préliminaire) ;
- de déterminer l'héritabilité de plusieurs traits morphologiques, et ainsi, pour la première fois ;
- de calculer les indices d'une trentaine d'étalons concernant ces traits.

Ces résultats ont des retombées directes pour les éleveurs. D'autres informations sont à venir, en particulier celles relatives au suivi longitudinal de la croissance et des aplombs.

L'application de la méthode en « routine » est maintenant à l'étude. ■

CREVIER-DENOIX N., POURCELOT P., RICARD A.*, AUDIGIE F., ERLINGER D., LAGACHE C., CONCORDET D.**, TAVERNIER L.***, DENOIX J.-M., DOUCET M.

UMR INRA-ENVA de Biomécanique et pathologie locomotrice du cheval, Ecole nationale vétérinaire d'Alfort

* Génétique quantitative, centre INRA de Castanet-Tolosan, Toulouse

** UMR 181 INRA-ENVT, Ecole nationale vétérinaire de Toulouse

*** Département hippique, centre d'enseignement zootechnique de Rambouillet

Bibliographie :

1. Barrey, E., Desliens, F., Blouin, C., Langlois, B. (2002a) Mesures du modèle, des allures et du saut des étalons nationaux par la méthode Equimétrix. 28ème Journée de la Recherche Equine, les Haras nationaux, 157-176.
2. Crevier-Denoix N., Erlinger D., Concorde D., Tavernier L., Lagache C., Pourcelot P., Denoix J.-M. (2004) Corrélations morphologie-aptitude sportive : étude préliminaire sur un effectif de 20 chevaux de niveau international en CSO et de 20 chevaux de classe D. 30ème Journée de la Recherche Equine, 2004, 10 pages.
3. Holmström, M., Magnusson, L.-E. and Philipsson, J. (1990) Variation in conformation of Swedish Warmblood horses and conformational characteristics of elite sport horses. *Equine Vet J.*, 22, 186-193.
4. Jaudon, J.P., Thoulon, F., Denoix, J.M. (1986) Contribution à l'étude des relations entre la morphologie et l'aptitude au saut d'obstacles chez le cheval de sport. *Pratique Vétérinaire Equine*, 18, 183-191.
5. Lacroix, V. (1999) Mise au point d'un protocole d'analyse morphométrique du cheval. Mémoire de DEA, Université de Paris XI-Orsay. 30 pages.
6. Langlois, B., Froideveaux, J., Lamarche, L., Legault, P., Tassencourt, L., and Theret, M. (1978) Analyse des liaisons entre la morphologie et l'aptitude au galop, au trot et au saut d'obstacle chez le cheval. *Ann. Génét. Sel. Anim.*, 10, 443-474.
7. Magnusson, L.-E. (1985) Studies on the conformation and related traits of Standardbred trotters in Sweden. IV. Relationship between conformation and performance in 4-year old Standardbred trotters. Thesis, SLU, Skara.
8. Mawdsley, A., Kelly, E.P., Smith, F.H., Brophy, P.O. (1996) Linear assessment of the thoroughbred horse : an approach to conformation evaluation. *Equine Vet J.* 28, 461-467.
9. Pourcelot, P., Audigie, F., Lacroix, V., Denoix, J.M., Crevier-Denoix, N. (2002) Suivi des paramètres morphométriques et des aplombs du cheval : une méthode 3-D. 28ème Journée de la Recherche Equine, 137-148.
10. Pourcelot P., Audigie F., Lacroix V., Denoix J.-M., Crevier-Denoix N. (2001) A method to measure 3-D morphometrical data without markers, using DLT technique. XVIII th International Society of Biomechanics Congress, Zurich (Suisse), 8-13 juillet 2001, 276.