43ème Journée de la Recherche Équine
Jeudi 16 mars 2017

Mensurations, allures, fonction cardiaque : sur quels critères indirects sélectionner pour optimiser la performance en endurance ?

C. Robert[1, 2], C. Blouin[2], D. Trachsel[1], E. Barrey[2]

[1] Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort, 7 av du Gal de Gaulle, 94704 Maisons-Alfort cedex
[2] GABI, INRA, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, 78350 Jouy-en-Josas, France

Résumé

L'objectif de cette étude était de déterminer des critères du phénotype qui soient à la fois 1/ facilement mesurables, 2/ associés à la performance en endurance et 3/ suffisamment héritables.

Entre 2011 et 2014, près de 1000 chevaux d'endurance ont été examinés à l'occasion de regroupements pour des compétitions de 90 à 160 km et lors des finales SHF à Uzès. Pour chacune des mesures caractérisant la morphologie, la locomotion et les dimensions cardiaques, les corrélations avec les indices de performance en endurance (IRE) et les héritabilités des mesures ont été calculées par méthode REML en prenant en compte un effet animal et les effets fixes sexe, âge, race et lieu de mesure.

La performance en endurance apparaît comme multifactorielle ; de nombreux éléments du phénotype sont faiblement corrélés aux indices et expliquent chacun une faible part de la performance. Certains (notamment le format et la fréquence de foulée au pas) ont une héritabilité moyenne à forte et peuvent à ce titre être pris en compte dans un schéma de sélection. Un cœur « d'athlète » est une caractéristique héritable favorable à la performance en endurance.

Mots clés : échocardiographie, indice, locomotion, morphologie, phénotype, sélection

Summary

The objective of this study was to determine phenotypic criteria that are both 1 / easily measurable, 2 / associated with endurance performance and 3 / sufficiently inheritable.

Between 2011 and 2014, about 1000 endurance horses were examined during 90 to 160 km competitions or the SHF finals in Uzès. For each of the measures characterizing morphology, locomotion and cardiac dimensions, the correlation with the endurance performance indices (IRE) and heritabilities were calculated with the REML method taking into account an animal effect and the fixed effects sex, age, breed and place of measurement.

Endurance performance appears to be multifactorial. Many elements of the phenotype are weakly correlated with the indices and each explain a small part of the results in competition. Some (notably the format and stride frequency) have medium to high heritability and can therefore be taken into account in a selection scheme. An "athlete" heart is an inherent characteristic favorable to endurance performance.

Key-words: echocardiography, index, locomotion, morphology, phenotype, selection

© Institut français du cheval et de l'équitation 2017

Introduction

Les courses d'endurance consistent à parcourir de longues distances (80-160 km) en plusieurs étapes de 30 à 40 km. Le nombre de courses d'endurance a considérablement augmenté ces dernières années avec une demande croissante de chevaux performants dans ce sport. Les chevaux de race Arabe et croisés Arabe semblent présenter les caractères physiologiques et génétiques les mieux adaptés pour les courses d'endurance (Ricard et Touvais, 2007).

Les chevaux d'endurance commencent l'entraînement à l'âge de 4 ou 5 ans et n'arrivent au haut niveau (course de 160 km en une journée) qu'à partir de 8 ans. Pour optimiser leur production, les éleveurs doivent pouvoir sélectionner les reproducteurs sur des critères qui soient à la fois associés à la réussite en compétition d'endurance et transmissibles à la descendance.

Quelle que soit la discipline, la sélection des chevaux repose sur le pedigree, les performances, la conformation et les allures. L'évaluation de ces deux derniers critères se fait traditionnellement de manière subjective notamment lors de concours de « modèles et allures ».

Pour améliorer l'aptitude sportive d'une race de chevaux par la sélection génétique, il faut déterminer quelle est la part du caractère transmis par les parents. C'est l'héritabilité (h^2) qui indique le pourcentage du caractère qui peut être transmis par un reproducteur à sa descendance. Par définition, l'héritabilité (h^2) est le rapport entre la variance génétique additive du caractère mesuré et la variance phénotypique totale de ce caractère (h^2 = variance génétique additive/variance phénotypique totale). L'héritabilité est comprise entre 0 et 1 (h^2 faible : inférieure à 0,2 ; h^2 moyenne entre 0,21 et 0,4 et h^2 élevée : supérieure à 0,4) (Bailey., 2014). Plus elle est proche de 1 et plus le caractère a de chance d'être transmis par les parents à leur descendance.

Chez le cheval, plusieurs études ont estimé l'héritabilité de différents paramètres de la performance. Chez le cheval d'endurance, les héritabilités de la vitesse et du classement pour les courses de 80-160 km sont respectivement de 0,28 et 0,06 (Ricard et Touvais, 2007). Chez le cheval arabe de course de plat, l'héritabilité est de 0,28 pour le temps de course et le record en course, tandis que l'héritabilité des gains varie entre 0,069 et 0,174 selon le critère pris en compte (Ekiz et Kocak 2005).

La présente étude a pour objectif de déterminer des critères du phénotype qui soient (1) facilement mesurables, (2) associés à la performance en endurance et (3) suffisamment héritables. Le but est de pouvoir proposer aux éleveurs et aux associations de race des critères objectifs et pertinents pour évaluer les jeunes chevaux destinés à l'endurance et caractériser les qualités ou les défauts à prendre en compte dans le choix des reproducteurs et les schémas de croisement.

1 Matériels et méthodes

1.1 Chevaux et protocole

Entre 2011 et 2014, dans le cadre du projet GenEndurance (http://genendurance.over-blog.com/), près de 1000 chevaux d'endurance ont été examinés à l'occasion de regroupements pour des compétitions de 90 à 160 km (chevaux de 7 ans et plus), dans quelques élevages et écuries spécialisées en endurance, lors des finales SHF à Uzès (chevaux de 4 à 6 ans) et dans quatre régions à l'occasion de regroupements de jeunes chevaux organisés avec les Groupements d'Eleveurs de Chevaux d'Endurance GECE locaux et l'Association du Cheval Arabe ACA. Les chevaux ont été recrutés sur la base de leurs ascendants (au moins un parent de race arabe) et du volontariat.

Tableau 1 : Caractéristiques de la population d'étude
Table 1: Study population

Type de chevaux	Années	Lieux	Nombre de sujets
Compétiteurs adultes	2011-2012	9 courses + 5 écuries	427
Jeunes chevaux (4 à 6 ans)	2011 à 2014	Uzès + 3 élevages	431 + 58
Jeunes chevaux (test d'effort)	2012 à 2014	4 sites	79
TOTAL			995

© Institut français du cheval et de l'équitation 2017

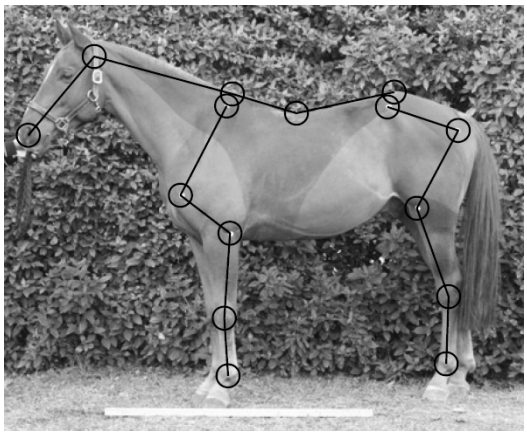
Après vérification de leur identité, les chevaux ont fait l'objet des examens suivants :

- des mesures directes : hauteur au garrot (HG), longueur entre la pointe de l'épaule et la pointe de la fesse (LC), périmètre thoracique en arrière du garrot (PT), épaisseur du pli cutané, poids mesuré à l'aide d'une balance ;
- une photographie numérique de profil au placer pour analyse morphométrique ;
- un enregistrement accélérométrique des allures (Equimétrix®) au pas et au trot en main ;
- une évaluation des réactions sur chacun des examens précédents ;
- une échographie cardiaque en mode bidimensionnel réalisée avec un échographe portable (Vivid I, General Electric Healthcare Europe GMBH) équipé d'une sonde 1,5-2,5 MHz avec enregistrement simultané de l'électrocardiogramme.

1.2 Traitement des données

Pour l'étude morphométrique, les repères anatomiques sont pointés sur les photographies numériques dans un ordre précis à l'aide du logiciel Equimétrix® (Barrey 2000). Les valeurs d'angles articulaires et de longueurs des rayons osseux (35 critères) sont calculées à l'aide du même logiciel (figure I). La surface corporelle (S) des chevaux est ensuite évaluée à l'aide de 5 méthodes mathématiques et/ou graphiques différentes (Tribout et al. 2014) et trois indices corporels sont calculés. La robe des chevaux est déterminée sur les photographies.

Figure I : Segments et angles articulaires mesurés pour chaque cheval à l'aide du logiciel Equimétrix ®
Figure I: Segments and articular angles measured for each horse using the Equimetrix® program



Pour les enregistrements accélérométriques des allures, des séquences de 10,24 secondes au pas et au trot sont sélectionnées pour analyse en s'assurant de la régularité du signal sur la période retenue. Le logiciel Equimétrix® calcule des variables :

- Cinématiques : fréquence de la foulée (foulées/s) et longueur de la foulée (m) ;
- De coordination : indice de symétrie et de régularité ;
- Énergétiques : puissance dorso-ventrale (W/kg), puissance de propulsion sur l'axe antéro-postérieur, puissance médio-latérale et puissance totale qui est la somme des puissances selon les trois axes.

Les enregistrements échographiques contenant trois à cinq cycles cardiaques ont été enregistrés et exploités avec un échographe Vivid I et le logiciel ECHOPAC (General Electric, Belgique). Sur chaque cycle cardiaque, 18 mesures ont été réalisées et 12 indices fonctionnels et structurels calculés. Pour chaque mesure et indice, la moyenne des valeurs obtenues sur trois cycles a été calculée. La normalité de distribution des paramètres a été vérifiée et le coefficient de variation calculé. L'influence de l'âge, du sexe et de la race a été étudiée à l'aide d'une analyse de variance (Maso 2015, Trachsel et al. 2016). Cette étape préliminaire a permis de sélectionner 11 critères majeurs présentant une variabilité suffisante entre les individus : volume d'éjection (SV), aire du VG (ventricule gauche) en diastole (LVIAd), longueur du VG en diastole (LVL), diamètre interne du VG en diastole (LVIDd), épaisseur moyenne des parois du VG (MWT), épaisseur relative des parois du VG

© Institut français du cheval et de l'équitation 2017

(RWT), Masse du VG (LMmass), diamètre de l'atrium droit (LAD max), aire de l'atrium droit (LAA max), diamètre aortique (AO) et diamètre de l'artère pulmonaire (PA).

Pour les chevaux de plus de 6 ans au moment de l'analyse des données, la performance en compétition d'endurance a été évaluée à partir des indices de performances endurance élaborés par l'INRA (Danvy et Depuille 2014). Un indice vitesse, un indice classement et un indice distance sont d'abord calculés, puis un indice final où l'indice distance intervient pour 40% et les indices vitesse et classement chacun pour 30% de l'indice final. L'indice distance est donc celui qui intervient le plus dans la valeur de l'indice final. Des corrections sont effectuées pour prendre en compte les effets sexe, race et âge.

1.3 Analyse statistique

L'analyse des données s'est déroulée en trois étapes :

1/ Une première analyse de variance (procédure GLM, SAS) a consisté à déterminer pour chaque mesure, l'influence du sexe (mâle/femelle), de la race (anglo-arabe AA, arabe AR, demi-sang arabe et autres croisés arabe DSA), du lieu de mesure (17 sites), de l'âge (6 classes : 4, 5, 6, 7-8, 9-11 et ≥ 12 ans) et de la robe (3 classes : alezan, bai et gris) ;

2/ Une analyse des corrélations (procédure Corr, SAS) de chaque mesure avec les indices de performance a ensuite été réalisée ;

3/ Pour les paramètres significativement corrélés aux indices de performances (r>0,10), l'héritabilité de chaque critère a été estimée à l'aide de modèles mixtes résolus par la méthode REML (VCE 6) prenant en compte les effets fixes sexe, âge, race et lieu (selon les résultats de l'étape 1/) et un effet génétique animal aléatoire.

2 Résultats

Les résultats des calculs d'héritabilité pour les mesures significativement corrélées aux indices de performance sont présentés dans le tableau 2.

2.1 Mensurations

Les mesures directes ont pu être analysées chez 829 chevaux. Parmi les cinq mesures disponibles, trois, la hauteur au garrot, le périmètre thoracique et la longueur corporelle sont faiblement corrélées aux indices de performance (r=0,1) ; leurs héritabilités sont élevées (h^2 = 0,72, 0,31 et 0,69 respectivement).

2.2 Morphométrie

Les mesures morphométriques par analyse d'image numérique ont pu être obtenues pour 787 chevaux. Sur les 43 mesures disponibles, 15 sont corrélées à au moins un indice de performance (et dans tous les cas, l'indice distance), mais ces corrélations sont faibles <0,20. Seules deux mesures parmi les 15 ont des héritabilités moyennes : la surface corporelle calculée selon la formule de Brody (h^2 = 0,32) et l'angle du dos (h^2 = 0,37).

2.3 Allures

L'analyse de la locomotion au pas et au trot en main a été réalisée sur un effectif de 752 chevaux. Pour 10 mesures évaluées à chaque allure, quatre mesures du pas (fréquence de foulée, symétrie, déplacement dorso-ventral et puissance dorso-ventrale) et le déplacement dorso-ventral au trot sont faiblement corrélés (r<0,15) aux indices de performance. L'héritabilité est moyenne pour la fréquence de foulée au pas (h^2 = 0,35) et faible (<0,20) pour les autres critères.

2.4 Echographie cardiaque

L'échographie cardiaque n'a été réalisée que chez 478 chevaux âgés de 4 à 6 ans au moment de l'examen. Sur les onze critères majeurs finalement retenus après une première analyse, cinq sont moyennement corrélés aux indices de performance en endurance (r=0,15 à 0,23) : le Volume d'éjection, l'Aire, la Masse et le Diamètre interne du Ventricule gauche, et le diamètre de l'Aorte. Leur héritabilité est moyenne (V. éjection, LVID et Aorte) à élevée (h^2 = 0,42 pour Aire du Ventricule gauche).

© Institut français du cheval et de l'équitation 2017

Tableau 2 : Corrélation avec les indices de performance en endurance et héritabilité des mesures phénotypiques obtenues chez 1.000 chevaux d'endurance français

Table 2: Correlation with endurance performance index and heritability of phenotypic measures obtained in 1.000 French endurance horses

		Corrélation avec IRE[1]				Héritabilité[2]	
Mesure	Effectif	Global	Vitesse	Class[t]	Distance	Moy	se
Mensurations directes							
Hauteur au garrot	957	0,1	0,079	0,093	0,1	**0,72**	0,12
Longueur corporelle	958	NS	NS	0,09	0,11	**0,31**	0,10
Périmètre thoracique	956	0,1	0,06	0,1	0,12	**0,69**	0,12
Morphométrie							
Angle du coude	724	0,11	NS	0,12	0,12	0,06	0,11
Angle du dos	724	0,11	NS	0,13	0,13	**0,37**	0,13
Indice de compacité	527	0,13	NS	0,14	0,16	0,00	0,10
Inclinaison du garrot	724	-0,11	NS	-0,12	-0,14	0,17	0,10
Longueur paturon postérieur	724	0,12	NS	0,13	**0,15**	0,05	0,08
Surface corporelle	527	**0,16**	NS	**0,17**	**0,19**	**0,32**	0,18
Profondeur du thorax	724	**0,17**	0,1	**0,17**	0,2	0,07	0,07
Allures au pas							
Déplacement dorso-ventral	687	0,12	0,11	0,13	0,11	0,12	0,11
Puissance dorso-ventrale	687	0,08	NS	0,11	0,1	0,14	0,13
Régularité	687	NS	NS	NS	NS	0,00	0,00
Fréquence de foulée	687	0,09	0,09	NS	NS	**0,35**	0,12
Symétrie	687	0,11	NS	0,14	0,12	0,04	0,12
Allures au trot							
Déplacement dorso-ventral	667	NS	NS	NS	NS	**0,31**	0,13
Puissance dorso-ventrale	667	0,09	NS	0,11	0,12	0,17	0,14
Régularité	667	NS	NS	NS	NS	0,20	0,16
Fréquence de foulée	667	NS	NS	NS	NS	0,08	0,13
Symétrie	667	NS	NS	NS	NS	0,03	0,08
Echocardiographie							
Aire du VG en diastole	313	**0,17**	**0,18**	NS	NS	**0,42**	0,34
Diamètre de l'aorte	238	NS	NS	**0,19**	**0,19**	**0,36**	0,30
Diamètre interne du VG	264	**0,2**	**0,23**	NS	NS	**0,29**	0,39
Masse du VG	263	**0,2**	**0,19**	**0,16**	**0,19**	0,13	0,30
Volume d'éjection	313	**0,18**	**0,18**	NS	0,15	**0,34**	0,28

Légende : IRE Indice de Performance en Endurance ; Classt classement ; Moy moyenne ; se erreur standard ; VG ventricule gauche ; 1 valeur du coefficient de corrélation ; 2 estimation de h2 calculée par méthode REML.

Les valeurs en gras sont celles qui représentent une corrélation moyenne ($r>0,15$; $p<0,01$) ou une héritabilité moyenne ($0,2<h^2<0,4$) à élevée ($h^2 \geq 0.4$)

© Institut français du cheval et de l'équitation 2017

3 Discussion

3.1 Protocole expérimental

Cette étude est à notre connaissance la première à mettre en relation le phénotype et la performance et à calculer l'héritabilité des critères phénotypiques associés à la performance en endurance. Elle porte sur un effectif de chevaux qui est substantiel et suffisant pour les calculs d'héritabilité.

Toutes les mesures ne sont pas nécessairement disponibles sur l'ensemble des chevaux soit pour des raisons pratiques : le site de certaines courses ne permettait pas l'utilisation d'une balance pour chevaux par exemple ; la piste de trotting n'était parfois pas de longueur suffisante pour avoir des enregistrements des allures de bonne qualité ; le tempérament de certains sujets a rendu impossible la réalisation de certaines mesures… Les échographies cardiaques n'ont été réalisées que chez les jeunes chevaux.

Le choix des mesures de phénotype réalisées a été dicté par les contraintes de terrain : il fallait des examens faciles à mettre en œuvre sur les sites de compétitions, rapides à réaliser et d'intérêt potentiel.

Pour la morphométrie, nous avons retenu une méthode en 2-Dimensions qui ne nécessite pas de matériel perfectionné ou long à positionner pour les mesures et dont l'analyse des données brutes est relativement rapide à réaliser de retour au laboratoire. Les limites de ce genre de technique sont bien connues et ont déjà été exposées antérieurement (Tribout et al. 2014).

La locomotion n'a été enregistrée qu'au pas et au trot en main. Ces allures ne sont pas nécessairement représentatives de celles développées en course où le galop est l'allure principale. En revanche, ces tests en main sont plus proches de ceux réalisés lors des examens vétérinaires pour la détection des irrégularités d'allures ou des boiteries à l'origine des éliminations en course. Sur le plan pratique, c'était le seul moyen d'obtenir des mesures sur un effectif élevé de chevaux (le temps de mesure par cheval n'est que de quelques minutes), à un même moment par rapport à l'effort (avant) et sur un sol à peu près homogène, tout en s'affranchissant de l'effet cavalier. La méthode accélérométrique est également plus globale mais plus sensible que d'autres méthodes cinématiques d'analyse de la locomotion. Elle permet néanmoins l'obtention de résultats rapidement dans des conditions de terrain.

Les examens d'échographie cardiaque n'ont pas été réalisés dans des conditions optimales : chevaux stressés par un environnement inconnu, temps d'examen limité à 10-15 minutes alors qu'un examen complet nécessite habituellement 45 à 50 minutes, luminosité parfois importante gênant une bonne visualisation des images lors de la réalisation de l'examen. Néanmoins, il a été possible d'obtenir des images exploitables des parties gauches du cœur sur quasiment l'ensemble des chevaux examinés.

La performance est évaluée à l'aide des indices de performance établis par l'INRA et l'IFCE. Ces indices de performance reflètent la carrière du cheval en prenant en compte l'ensemble de ses résultats en course d'endurance depuis ses premières sorties. Des corrections sont apportées pour intégrer l'effet de l'âge et du sexe afin de rendre tous les chevaux comparables (Danvy et Depuille 2014). La performance est ainsi représentée par plusieurs valeurs quantitatives ce qui facilite les analyses statistiques. Ces indices comportent néanmoins quelques limites à considérer : ils ne concernent que les chevaux français et ne prennent en compte que les concours ayant lieu en France ; les chevaux ayant couru avant 2002 ne sont pas indicés. Leur précision s'améliore avec l'âge du cheval et son nombre d'années en compétition : ceci peut constituer un biais dans la mesure où la moitié des chevaux de notre effectif étaient âgés de 4 à 6 ans lors des mesures ; leurs indices sont donc moins précis que ceux des chevaux performers en 2011.

3.2 Résultats

Sur l'ensemble des mesures réalisées (5 mesures directes, 43 mesures morphométriques, 20 mesures d'allure et 11 mesures cardiaques), sept présentent une bonne corrélation avec un ou plusieurs indices de performance et 13 une corrélation significative mais faible.

Les indices de performance apparaissent légèrement plus élevés chez les chevaux de plus grand format. L'effet bénéfique sur la performance est néanmoins très faible. En revanche, la taille est un critère fortement héritable, ce qui est bien connu dans de nombreuses espèces. Chez le cheval, l'héritabilité de la hauteur au garrot varie de 0,49 à 0,78 selon les races et les études (Schroderus et Ojala 2010). L'héritabilité de la conformation est bonne, avec là encore des valeurs variant entre 0,16 et 0,58 selon les races et les méthodes utilisées (Schroderus et Ojala 2010). Chez le cheval de race arabe, des valeurs d'héritabilités moyenne à élevée ont été rapportées dans une étude réalisée en Iran (Gharahveysi et al. 2008) avec des valeurs de h^2 de 0,57, 0,27 et 0,26 pour la hauteur au garrot, la longueur corporelle et le périmètre thoracique respectivement. Ces valeurs sont légèrement inférieures aux nôtres, mais elles ont été calculées sur un effectif beaucoup plus réduit aussi bien en termes de chevaux mesurés (13) que de chevaux inscrits au stud-book local (2.522 chevaux). Chez le cheval Franche-Montagne, deux loci situés sur les chromosomes 3 et 9 sont

© Institut français du cheval et de l'équitation 2017

significativement associés à la hauteur au garrot (Signer-Hasler et al. 2012), le premier étant également associés à d'autres caractéristiques morphologiques telles que la conformation des membres, la rectitude des allures et l'expression de la tête.

Les mesures morphométriques sont faiblement ou pas corrélées à la performance. Ce résultat avait déjà été montré sur des effectifs plus restreints (Tribout et al. 2014). Une surface corporelle assez grande semble un facteur plus favorable à la performance : la surface corporelle étant estimée à l'aide des mensurations, ceci n'est pas surprenant (cf. ci-dessus). Par ailleurs, une plus grande surface corporelle va de pair avec des capacités de thermorégulation plus grandes, ce qui est capital en endurance où le principal challenge pour le sportif est d'éliminer la chaleur produite par l'effort musculaire. Une grande profondeur de thorax apparaît également un élément favorable à la performance : outre son lien avec la taille (cf. ci-dessus), cette caractéristique morphologique traduit également une grande capacité respiratoire, ce qui augmente les capacité d'oxygénation et d'évaporation de la chaleur. L'héritabilité des mesures morphométriques apparait très variable selon les mesures. La majorité des mesures sont peu héritables, mais certaines ont une héritabilité moyenne. Cette variabilité a déjà été rapportée dans d'autres études. Le travail de Love et al. (2006) réalisé sur 3916 yearlings Pur-Sang montre que la conformation des parties distales des membres est peu héritable (h^2 = 0,16 à 0,18), tandis que celle des parties proximales (genou, jarret) l'est davantage (h^2 = 0,38 à 0,66).

La locomotion en main montre une faible association avec les indices de performance. Le pas semble plus informatif que le trot avec 4 mesures significativement corrélées aux indices contre une seule au trot. D'une part, ceci s'explique par la lenteur du pas qui permet une bonne décomposition de l'allure. D'autre part, les enregistrements sont plus réguliers au pas et moins parasités par des mouvements intempestifs du cheval (comportement excité ou flexion latérale de l'encolure). L'héritabilité des allures apparaît faible à moyenne avec des valeurs plutôt plus élevées au trot qu'au pas. Ceci a déjà été observé dans d'autres races avec des héritabilités variant entre 0,16 et 0,34 (Schroderus et Ojala 2010).

La moitié des mesures cardiaques retenues pour cette étude présentent une corrélation correcte avec les indices de performance. Plus le cœur est de grande taille, plus sa contraction est puissante et plus sa contenance est élevée, meilleure est la performance. Ces mesures correspondent à ce qui est communément appelé un « cœur d'athlète ». Ces capacités cardiaques s'améliorent avec l'entraînement, mais elles semblent également d'origine génétique : l'héritabilité de ces mesures cardiaques apparaît élevée. Ceci renforce les données fonctionnelles issues d'une étude précédente (Younes et al. 2016) qui montraient que le temps de récupération cardiaque était un critère de performance héritable (h^2 = 0,45).

3.3 Bilan et perspectives

Les valeurs d'héritabilités sont étalées de faible à élevée selon le type de mesure, mais dans des valeurs attendues pour ce genre de traits. Ceci indique que les facteurs de variation liés à l'environnement jouent un rôle plus important dans la réussite en endurance que les effets polygéniques additifs.

La performance en endurance apparaît donc bien comme multifactorielle ; de nombreux éléments du phénotype expliquent chacun une faible part de la performance. Certains (notamment le format et la fréquence de foulée au pas) ont une héritabilité moyenne à forte et peuvent à ce titre être pris en compte dans un schéma de sélection. Un cœur « d'athlète » est une caractéristique héritable favorable à la performance en endurance.

Tous les chevaux de cette étude ayant fait l'objet d'un génotypage, ce travail se poursuit par la recherche des facteurs génétiques sous-jacents à chacun des critères apparus comme bien héritable et corrélé aux performances dans cette étude.

Remerciements

A l'IFCE, au Fonds Eperon et à l'ACA pour leur soutien financier au projet GenEndurance.

Aux éleveurs, propriétaires, cavaliers et entraîneurs qui ont permis les mesures et prélèvements sur leurs chevaux.

Aux organisateurs d'épreuves d'endurance et aux officiels de compétitions qui ont autorisé et aidé à la mise en œuvre des protocoles sur les terrains de concours.

Au personnel de l'équipe BIGE et aux étudiants vétérinaires, pour leur aide au recueil des mesures.

© Institut français du cheval et de l'équitation 2017

Références

Bailey, E. (2014) Heritability and the Equine Clinician. Equine Veterinary Journal 46(1): 12–14.

Barrey E., Desliens F., Poirel D., Biau S., De Beauregard S., Langlois B. (2000) Mesures du modèle et des allures chez les jeunes chevaux destinés au dressage : comparaison des races françaises, allemandes et espagnoles. *Compte-rendu de la 26ème Journées de la Recherche équine*, Les Haras Nationaux, Paris, France, 1er mars 2000, 89-97.

Borgetto, B. (2016) Evaluation accélérométrique de la locomotion des jeunes chevaux d'endurance. Th. Doct. Vét. Alfort. 184 pages. http://theses.vet-alfort.fr/telecharger.php?id=2111

Colin de Verdière, J. (2014). Caractérisation de la locomotion du cheval d'endurance : critères associés à la performance en course à vitesse libre. Th. Doct. Vét. Alfort. 102 pages. http://theses.vet-alfort.fr/telecharger.php?id=1698

Danvy, S., Depuille, C. (2014) Les indices de performance et génétiques en endurance. http://www.haras-nationaux.fr/information/accueil-equipaedia/genetique-caracterisation/indices-utilisation/les-indices-en-endurance.html

Ekiz B, Kocak O. (2005) Phenotypic and genetic parameter estimates for racing traits of Arabian horses in Turkey. J Anim Breed Genet. 122(5):349-56.

Gharahveysi S, Kashan NE, Gerami A, Torshizi RV (2008) Estimation of genetic parameters on conformation traits of the Iranian Arab horses population. Pak J Biol Sci. 11(2):280-4.

Hervé, G. (2015). Effets combinés de l'âge et du niveau d'entraînement sur les paramètres d'échographie cardiaque en mode bidimensionnel chez des chevaux d'endurance de 4 à 6 ans. Th. Doct. Vét. Alfort. 94 pages. http://theses.vet-alfort.fr/telecharger.php?id=2061

Maso, D. (2015) Evaluation échographique des variations de morphologie cardiaque à l'effort chez de jeunes chevaux d'endurance. Th. Doct. Vét. Alfort. 194 pages. http://theses.vet-alfort.fr/telecharger.php?id=2058

Love S, Wyse CA, Stirk AJ, Stear MJ, Calver P, Voute LC, Mellor DJ. (2006) Prevalence, heritability and significance of musculoskeletal conformational traits in Thoroughbred yearlings. Equine Vet J. 38(7):597-603.

Ricard, A., and M. Touvais. (2007) Genetic Parameters of Performance Traits in Horse Endurance Races. Livestock Science 110(1–2): 118–125.

Schroderus E, Ojala M. (2010) Estimates of genetic parameters for conformation measures and scores in Finnhorse and Standardbred foals. J Anim Breed Genet. 127(5):395-403.

Signer-Hasler H, Flury C, Haase B, Burger D, Simianer H, Leeb T, Rieder S. A genome-wide association study reveals loci influencing height and other conformation traits in horses. PLoS One. 2012;7(5):e37282.

Trachsel, D.S, Giraudet A., Maso, D., Hervé, G., Hauri, D.D., Barrey, E., Robert, C. (2016) Relationship between body dimensions, body weight, age, gender, breed and echocardiographic dimensions in young endurance horses. BMC Vet Res. 12:226, https://bmcvetres.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12917-016-0846-x

Tribout, P. (2013) Etude morphométrique du cheval d'endurance de race arabe et croisé arabe en relation avec la performance. Th. Doct. Vét. Alfort. 94 pages. http://theses.vet-alfort.fr/telecharger.php?id=1648

Tribout P., Robert C., Rivière J, Desjardins C, Mata X, Blouin C, Ricard A, Barrey E. (2014) La morphologie du cheval d'endurance explique une faible part de la performance en course. Compte-rendu de la 40ème journée de la Recherche Equine, Paris, 18 mars 2014. 7-15.

Triquenaux, M. (2015) Etude morphométrique des jeunes chevaux d'origine Arabe : effet de l'âge et aspect prédictif de l'aptitude à l'endurance. Th. Doct. Vét. Alfort. 84 pages. http://theses.vet-alfort.fr/telecharger.php?id=1963

Younes M, Robert C, Blouin C., Cottin F, Barrey E (2016) Héritabilité de la récupération cardiaque chez le cheval d'endurance. Compte-rendu de la 42ème journée de la Recherche Equine, Paris, 17 mars 2016.

© Institut français du cheval et de l'équitation 2017