



## Morphométrie 3D, hérédité et performance en CSO

Anne Ricard<sup>1,2</sup>, Bernard Dumont Saint Priest<sup>2</sup>, Domitille Billerey-le-Menn<sup>2</sup>, Clotilde Dubois<sup>2</sup>, Léa Gosselin<sup>2</sup>, Catherine Ruhlmann<sup>2</sup>, Frédéric Guillot<sup>2</sup>, Philippe Pourcelot<sup>3</sup>, Nathalie Crevier-Denoix<sup>3</sup>, Sophie Danvy<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> INRA, UMR 1313, GABI

<sup>2</sup> IFCE, Département recherche et Innovation

<sup>3</sup> ENVA Unité Sous Contrat 957, Biomécanique et Pathologie Locomotrice du Cheval

[anne.ricard@inra.fr](mailto:anne.ricard@inra.fr)



### Ce qu'il faut retenir

La morphométrie en 3 dimensions permet de déterminer les morphotypes représentatifs de la variabilité morphologique du Selle français. Les types les plus importants sont caractérisés par la largeur à la pointe des épaules et des hanches et une géométrie en carré ou en rectangle qui induit des contraintes morphologiques sur le plan sagittal : le carré est associé à une plus grande profondeur, des rayons longs, des jarrets droits et une épaule verticale. Aucun de ces morphotypes n'est lié à la performance en compétition, excepté le format global, mais ils sont héréditaires : chacun peut donc sélectionner le morphotype adapté à sa morphologie de cavalier et à son équitation.

### Résumé

Un échantillon de 2092 jeunes chevaux de concours hippique a été filmé pour relever 43 repères anatomiques dans les 3 dimensions représentant le cheval. L'analyse de ces données morphométriques a été réalisée par surimposition Procruste avec le logiciel Geomorph : les formes sont séparées du format global et déterminées par analyse en composante principale. L'analyse génétique inclut l'effet de l'âge, du sexe, du concours, du manipulateur, de l'angle des canons avec la verticale et un effet génétique relié entre chevaux par une matrice de parenté (18 029 ancêtres). Les morphotypes les plus importants sont caractérisés par la largeur à la pointe des épaules et des hanches et une géométrie en carré ou en rectangle qui induit des contraintes morphologiques sur le plan sagittal : le carré est associé à une plus grande profondeur, des rayons longs, des jarrets droits et une épaule verticale. L'héritabilité des différents morphotypes est faible pour les différences dans le plan frontal (0.10 pour les postérieurs, 0.06 pour les antérieurs), et modéré pour les principales différences dans le plan sagittal (0.27) ainsi que pour le format global (0.18). Aucune corrélation significative n'a été trouvée avec la performance en compétition de saut d'obstacle.

## 1 Contexte et objectifs

Le projet SoGen a pour objectif la caractérisation de la morphologie et des allures des chevaux de sport afin d'inclure ces caractères dans l'objectif d'élevage. Ce travail s'inscrit dans ce projet et concerne la morphologie. La morphologie en 3 dimensions d'un échantillon de plus de 1300 chevaux a été enregistrée à l'aide de la méthodologie développée par N. Crevier Denoix et P. Pourcelot (1, 2). Cette technologie permet de situer dans l'espace les coordonnées de points articulaires ou remarquables des massifs antérieur et postérieur à partir de 2 images de référence extraites d'une vidéo au pas.

La synthèse des différences morphologiques du cheval de concours hippique français en morphotypes, l'héritabilité de ces morphotypes et leur relation avec la performance sont présentés ici.

## 2 Matériel

### 2.1 Description de la méthodologie Morpho-3D

La méthode de morphométrie 3 D consiste à filmer le cheval au centre de 4 caméras : une de face, une de dos, et 2 de profil en oblique. La zone a été calibrée en avance. Parmi les images, le manipulateur retient 2 références : une quand l'antérieur droit est vertical, l'autre quand le postérieur droit est vertical. Sur ces images, il traque la position de 15 points et 13 points respectivement, définis anatomiquement (Figure I). Les 3 coordonnées de chacun de ces points sont enregistrées.

Figure I. Images du logiciel de positionnement des repères anatomiques. Massif antérieur/ Massif postérieur.



### 2.2 Echantillon

Les chevaux ont été mesurés à l'occasion de 8 concours de jeunes chevaux de CSO en 2015 et 2016. A ce fichier, des chevaux qui avaient été mesurés en 2002 lors d'une étude commanditée par l'ANSF (3) ont été rajoutés. Après suppression des points aberrants, l'effectif total est de 2092 chevaux. Les 2092 chevaux étudiés proviennent pour 784 du phénotypage de 2002 (37%) et pour 1308 de la nouvelle campagne dont 736 (35%) en 2015 et 572 (27%) en 2016. Les sexes et les âges sont équilibrés : les juments représentent 49% des chevaux mesurés, les 4 ans 51%, les 5 ans 47%. En 2002, 36 étalons adultes avaient été enregistrés en plus des 4 et 5 ans. Les races représentées sont au nombre de 27. Les selle français (SF) sont largement majoritaires (91%), les selle étrangers sont 5% (dont près de la moitié sont des Z), les origines constatées sont 2% et les anglo-arabes 2%. En 2002, la morphométrie avait été mesurée lors de 8 concours et en 2015 et 2016 lors de 16 concours. Les effectifs par concours varient de 15 à 201 avec une moyenne de 87 et sont suffisants pour permettre l'ajout de cet effet dans le modèle d'analyse.

### 2.3 Parenté

Pour réaliser les études génétiques, il est nécessaire d'avoir un nombre de relations de parenté entre les chevaux mesurés important, notamment de larges familles paternelles. Les 2092 chevaux sont issus de 583 pères (3.6 produits par père en moyenne). Cinquante-trois pères ont 10 produits et plus (jusqu'à 82 pour DIAMANT DE SEMILLY). Certains pères (42) étant aussi mesurés, ils forment 426 couples pères –produits pour étayer les analyses génétiques. Coté mères, 133 juments ont 2 produits et plus dans l'échantillon et 12 ont aussi été mesurées. Ces pères permettront aussi de faire le lien entre les concours qui ont servi de lieu de mesure pour estimer correctement cet effet sans confusion avec le niveau génétique. Ainsi, près de la moitié des pères (281) ont des produits dans deux concours, 67 pères ont des produits dans au moins 5 concours, un père a des produits dans 21 concours. Pour réaliser l'analyse génétique les généalogies sont remontées sur 6 générations, ce qui représente 18029 chevaux.

## 2.4 Performances en compétition

La performance en compétition est mesurée par l'indice de saut d'obstacle (ISO). Cet indice, calculé à partir de deux critères de mesure de la performance : le classement dans chaque épreuve et un cumul de points annuels, est déjà corrigé pour les différences dues à l'âge, au sexe et à l'année.

Les performances moyennes des chevaux de la morpho-3D sont supérieures à celles de la population des chevaux de concours : ISO moyen de 107.7 pour les chevaux mesurés en 2002 avec 6.8 années de performance et moyenne de 109.6 pour les chevaux « SoGen » avec 3.4 années de performance. Heureusement il demeure une assez grande variabilité des performances (minimum 51, maximum 184) qui permettra d'identifier les relations entre morphométrie et performance.

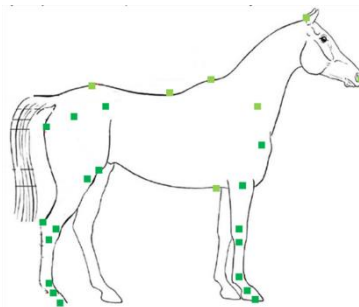
Pour calculer la corrélation génétique entre morphométrie et performance, les performances de l'échantillon morpho-3D ne sont pas les seules utilisées. Les performances de tous les chevaux sortis en compétition nés à partir de 1997 sont incluses. Elles permettent d'augmenter la précision de l'estimation de cette corrélation grâce aux relations de parenté qui lient ces chevaux à ceux de la morpho-3D. De plus elles permettent de mesurer et donc de corriger la sélection dont les chevaux morpho-3D ont fait l'objet. Ces 649 491 performances annuelles ont été réalisées par 160 056 chevaux. Leurs apparentés représentent 352 696 chevaux sur 4 générations.

## 3 Méthode

### 3.1 Analyse des morphologies

Les coordonnées des images antérieures et postérieures ont été rassemblées pour constituer l'ensemble des coordonnées d'un cheval. Ces coordonnées ne correspondent pas à une position réelle du cheval car elles ont été prises à des moments différents du pas. Elles permettent néanmoins de synthétiser une forme propre au cheval. Parmi les trois points redondants entre l'image « antérieure » et l'image « postérieure », deux ont été pris dans l'image antérieure : le sommet du garrot et de la croupe et un à l'image postérieure : la pointe de la hanche. Pour donner une forme en trois dimensions, les points du côté gauche ont été créés en miroir du côté droit qui a servi pour le recueil des points. Pour les points de l'encolure et de la tête, nous avons retenu le point de sortie de l'encolure mais sa position et la position de la tête ont été standardisées avec un angle fixe pour tous. Chaque cheval est donc finalement caractérisé par 43 points de 3 coordonnées (Figure II).

Figure II. Les 43 références morphologiques retenues (les points verts clairs sont sur l'axe médian, les points verts foncés sont doublés latéralement), d'après J.M. Denoix.



Les coordonnées ont été corrigées pour l'âge et le sexe du cheval et pour des effets d'environnement comme le concours, le dépouilleur, l'angle du canon antérieur ou postérieur au moment de la prise de vue.

A partir des coordonnées, l'analyse traditionnelle morphométrique utilise une large palette de mesures déduites : distances, angles, rapports de distance, surface ou volume. Cependant, au-delà du problème posé par la multiplicité des mesures générées, ces analyses ne permettent pas de séparer d'une part les formes et d'autre part le développement général du cheval. L'idée de s'affranchir de cette dépendance et de créer des coordonnées par surimposition « Procrustes » s'est imposée dans l'analyse de la morphométrie dans de nombreuses disciplines. C'est cette technique qui est utilisée ici, avec l'aide du logiciel R Geomorph (4).

Le centre de gravité du cheval est calculé par la moyenne des coordonnées de tous les points. Le « format global » du cheval est la racine carrée de la somme des écarts de toutes les coordonnées au centre de gravité. Il donne une idée du développement du cheval dans toutes les directions (verticale, longitudinale, latérale). Ensuite, tous les points sont standardisés pour que tous les chevaux soient ramenés à un « format global » identique de 1. Enfin, les points de tous les chevaux sont surimposés de telle manière que la somme des distances entre les repères analogues chez les différents chevaux soit minimale. Au final, le cheval est

caractérisé par son « format global » et par sa forme donnée par les nouvelles coordonnées « procrustes » (5, 6).

Une analyse en composante principale (ACP) est réalisée sur les coordonnées pour définir les principaux morphotypes représentatifs de la population. Cette analyse considère simultanément tous les points et toutes les directions. Les composantes principales les plus importantes constituent les « morphotypes » qui sont analysés d'un point de vue génétique.

### 3.2 Analyse génétique

Le modèle d'analyse des « morphotypes » intègre des effets propres au cheval comme son âge et son sexe, des effets d'environnement comme le concours, le dépouilleur, l'angle du canon antérieur ou postérieur au moment de la prise de vue, et un effet génétique qui permet de relier tous les chevaux apparentés :

$$\text{Mesure} = \text{sexe} + \text{âge} + \text{concours} + \text{angle canon} + \text{dépouilleur} + \text{valeur génétique du cheval} + \text{résiduelle}$$

Le modèle d'analyse des ISO n'inclura que la valeur génétique du cheval et un effet d'environnement permanent propre au cheval (ensemble des conditions de milieu stable d'une année à l'autre indépendantes de la génétique du cheval) car l'âge, le sexe et l'année ont déjà été corrigés dans le calcul de l'ISO.

Dans les deux cas, les valeurs génétiques sont reliées par la matrice de parenté calculée à partir des généalogies. Une première analyse a été faite sur les 9 principaux morphotypes et le « format global » simultanément. La corrélation avec les performances en CSO est ensuite estimée à partir de 10 analyses bi-caractères compte tenu de l'importance des effectifs.

Rappelons que la corrélation phénotypique mesure la relation observable entre mesures et/ou performances et que la corrélation génétique mesure la relation entre les aptitudes intrinsèques.

## 4 Résultats

### 4.1 Morphotypes

L'analyse en composantes principales permet de dégager 10 morphotypes expliquant plus de 80% de la variance morphologique. Le premier morphotype explique 27% de la variance, le deuxième 18% et le troisième 14% puis la proportion passe à 5% et décroît pour atteindre 2% pour la dixième composante. Ces 10 premières composantes principales sont donc un bon résumé des formes en présence.

La figure III illustre les 3 premiers morphotypes grâce à une visualisation du type « mesh » (maillage) qui déforme une grille standard pour rapprocher les points morphologiques situés différemment dans les extrêmes de chaque morphotype. Pour rendre les figures lisibles, bien que l'analyse porte dans les trois dimensions, la projection selon le plan le plus représentatif du type est dessinée (frontale ou sagittale).

Figure IIIa. Morphotype 1, cas extrêmes, vue frontale, postérieure (les déviations sont exagérées pour plus de lisibilité)

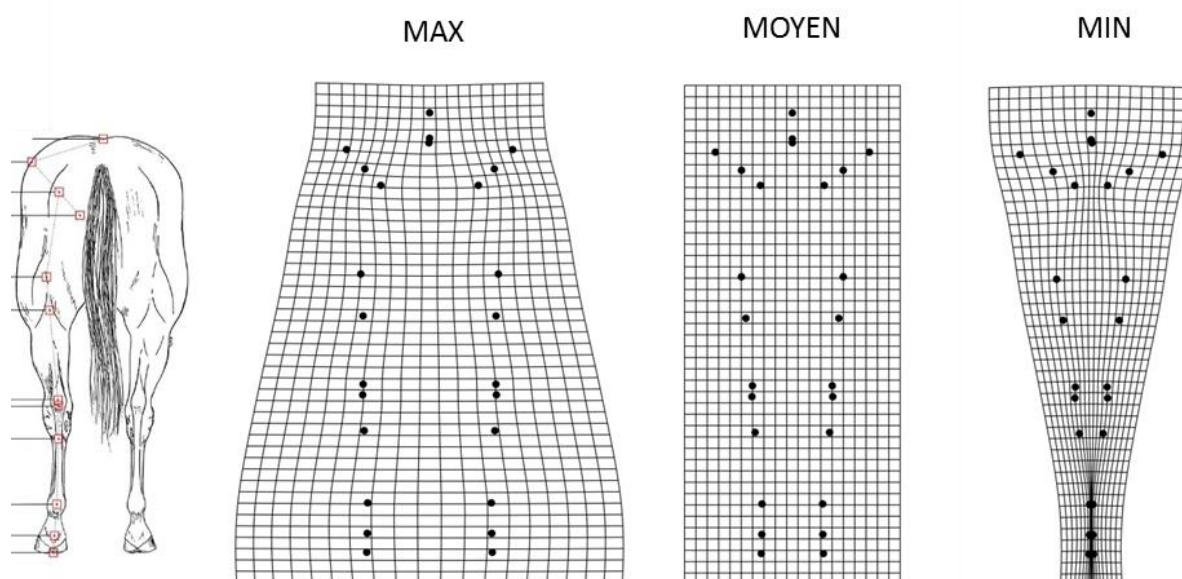


Figure IIIb. Morphotype 2, cas, extrêmes, vue frontale, antérieurs (les déviations extrêmes sont exagérées pour plus de lisibilité)

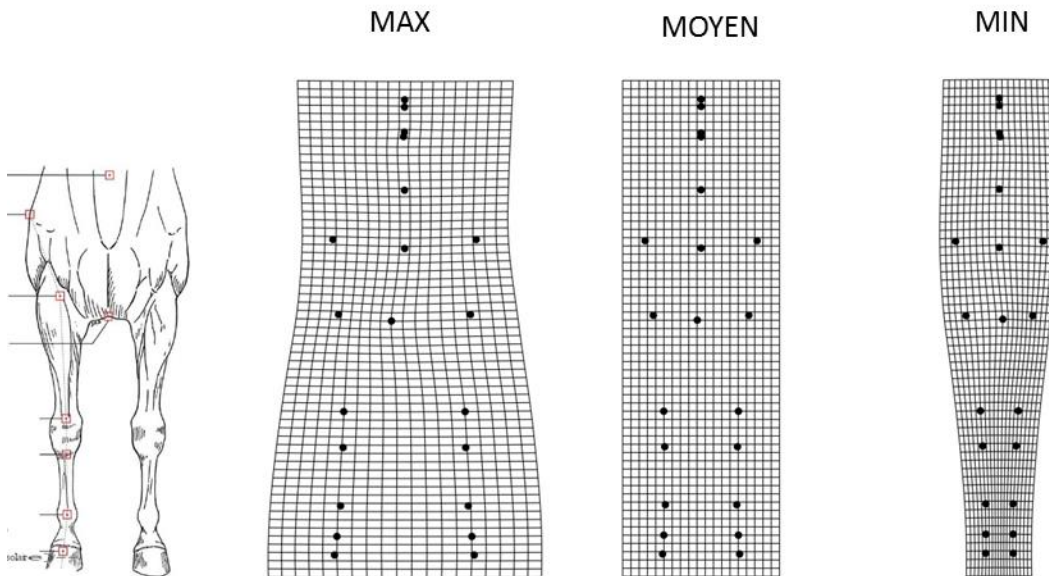
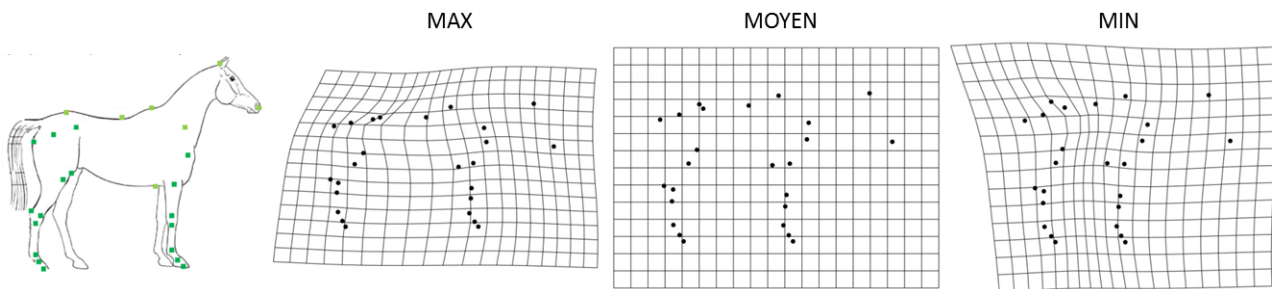


Figure IIIc. Morphotype 3, cas extrêmes, vue sagittale (les déviations extrêmes sont exagérées pour plus de lisibilité)



#### 4.2 Héritabilité et corrélations génétiques

Les héritabilités et les corrélations génétiques ( $r_g$ ) des 9 morphotypes principaux et du « format global » sont reportées dans le Tableau 1. Par définition les corrélations phénotypiques sont nulles. Les morphotypes sont nommés par les traits les plus marquants de différenciation entre les deux extrêmes qu'ils décrivent mais ils ne sauraient en être le seul résumé.

Le « format global » se révèle moins héritable (0.18) que la classique « taille au garrot » qui combine le développement général et un morphotype favorisant la hauteur par rapport à la largeur ou la longueur. Les composantes « frontales » sont peu héritables : 0.10 (postérieur) et 0.06 (antérieur) pour les deux premières composantes alors qu'elles représentent une forte part de la variabilité morphologique. Les morphotypes les plus héritables sont le 3 (0.27, géométrie en rectangle versus en carré), le 6 (0.25, orientation en montant versus en descendant) et le 8 (0.24, sortie de l'encolure haute associée à des jarrets droits versus sortie de l'encolure basse et jarrets coudés).

Chaque morphotype intègre intrinsèquement des corrélations génétiques entre les positions des points de repères : leur définition même renvoie à un ensemble de caractéristiques morphologiques et non à une seule mesure ou observation d'une seule partie du cheval. Il est cependant possible de compléter ce tableau par les corrélations génétiques entre morphotype. Ces corrélations donnent une idée de l'ensemble de la production morphologique d'un même étalon (ou d'une même poulinière). Les faits essentiels sont les suivants :

- Un étalon ou une poulinière qui produit des chevaux « dans un rectangle » (3) aura tendance à produire des chevaux étroits et serrés de devant (2) comme de derrière (1) ( $r_g = 0.44$  et  $0.49$ )

- Un étalon ou une poulinière qui produit des chevaux « dans un rectangle » (3) aura tendance à produire par ailleurs des chevaux à la croupe inclinée et des jarrets coudés (9) ( $r_g=0.50$ )
- Un étalon ou une poulinière qui produit des chevaux serrés de derrière les produira quelle que soit la largeur des hanches (1) et (4) ( $r_g=0.76$ ), associé à des aplombs postérieurs cagneux et varus ainsi qu'à des jarrets coudés.
- Un étalon ou une poulinière qui produit des chevaux larges aux épaules et serrés (7) produira des chevaux avec une encolure sortie haut (8) ( $r_g=0.56$ )

Le « format global » n'est pas génétiquement indépendante des morphotypes, une forte croissance engendre donc aussi des différences de formes. Ainsi, un « format global » important est génétiquement lié à des hanches étroites (1), des postérieurs cagneux-varus (4), une orientation en montant (6), une encolure sortie haut.

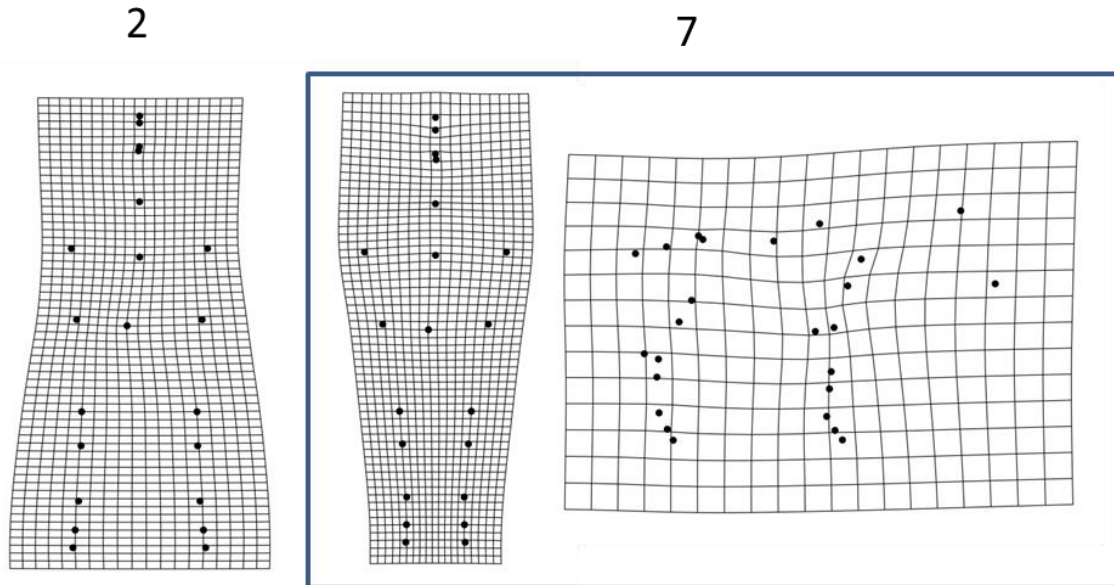
Tableau 1 : Héritabilité (diagonale) et Corrélations génétiques entre morphotypes et format global.

|   | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6    | 7     | 8    | 9     | FG   |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|-------|------|
| 1. Hanche-Postérieurs ouverts/serrés                        | 0.10  |       |       |       |       |      |       |      |       |      |
| 2. Epaule-Antérieurs large-ouverts /étroite-serrés          | -0.07 | 0.06  |       |       |       |      |       |      |       |      |
| 3. Géométrie rectangle/carré                                | -0.49 | -0.44 | 0.27  |       |       |      |       |      |       |      |
| 4. Postérieurs coudés-cagneux-varus/droit-panard-valgus     | -0.76 | -0.07 | 0.28  | 0.10  |       |      |       |      |       |      |
| 5. Sortie encolure-Jarret haut-coudé/bas-droit              | 0.09  | -0.29 | -0.03 | -0.37 | 0.14  |      |       |      |       |      |
| 6. Orientation en montant/en descendant                     | -0.03 | -0.14 | 0.25  | 0.39  | 0.07  | 0.25 |       |      |       |      |
| 7. Epaule (front.)-Rayons (sag.) large-courts/étroite-longs | 0.10  | 0.31  | 0.14  | -0.31 | 0.30  | 0.26 | 0.09  |      |       |      |
| 8. Sortie encolure-Jarret haut-droit/bas-coudé              | -0.13 | -0.09 | -0.01 | 0.17  | -0.04 | 0.34 | 0.56  | 0.24 |       |      |
| 9. Croupe horizontale/inclinée                              | 0.04  | -0.34 | 0.50  | 0.23  | -0.34 | 0.14 | -0.05 | 0.06 | 0.10  |      |
| Format Global   | -0.40 | -0.31 | 0.18  | 0.42  | -0.23 | 0.42 | -0.02 | 0.56 | -0.25 | 0.18 |

#### 4.3 Relation avec la performance en compétition.

Aucune corrélation génétique ou phénotypique entre la performance en compétition et les morphotypes n'a été mise en évidence. La seule corrélation génétique statistiquement significative est la corrélation avec le « format global » : 0.28 ( $\pm 0.08$ ). La corrélation la plus élevée mais non significativement différente de 0 est 0.12 ( $\pm 0.08$ ) avec la composante 8 : sortie de l'encolure haute, cheval en rectangle avec les membres antérieurs reculés par rapport à la pointe de l'épaule, les jarrets droits et en avant par rapport à la pointe de la fesse, le tibia long. Deux morphotypes ont une corrélation phénotypique de 0.05 avec la performance en compétition mais sont trop peu hératables pour mettre en évidence un lien génétique : le 2 et le 7, soit un effet favorable d'épaules larges vue de face que les antérieurs soient ouverts ou serrés, avec des rayons antérieurs courts, une épaule petite vue de profil et droite (Figure V).

Figure V. Morphotypes 2 et 7 avec une tendance phénotypique favorable à la performance



## 5 Applications pratiques

L'objectif est de proposer des évaluations génétiques pour la morpho-3D. Ainsi, en plus des jugements du modèle, l'éleveur aura à sa disposition un outil pour orienter la morphologie de son futur poulain par le choix d'accouplements judicieux. Actuellement, l'effectif du fichier permet d'estimer une cinquantaine d'étalons avec une précision suffisante.

L'absence de corrélation notable avec la performance en compétition de saut d'obstacle laisse à chacun le choix d'un morphotype adapté à la morphologie du cavalier et à son équitation.

## 6 Perspectives

Pour monter en puissance, l'évaluation morpho-3D nécessite l'augmentation des effectifs mesurés et le passage à l'évaluation génomique.

Réaliser un recueil de morpho-3D aussi généralisé que celui de la performance en compétition (65 000 chevaux par an dont 4500 4 ans) n'est pas envisageable. Cependant, il faut prévoir un apport régulier de nouvelles mesures pour assurer la pérennité des évaluations. L'organisation d'un chantier de mesure est certes exigeante mais s'est assez bien couplée aux concours de jeunes chevaux et pourra être renouvelée. Le point limitant est plutôt le dépouillement des vidéos et le positionnement des points repères. Avec l'expérience acquise, nous pouvons proposer un nouveau protocole d'extraction des points repères sans perte de précision anatomique mais avec un gain de temps considérable. Ce nouveau protocole nécessiterait des développements informatiques supplémentaires pour prédire les repères anatomiques à partir des repères visuels facilement automatisables (contraste de l'image, silhouette).

L'évaluation génomique est l'autre levier pour démultiplier l'efficacité des phénotypes recueillis. En effet, la précision d'une évaluation génétique classique d'un cheval repose sur le nombre et la proximité de ses apparentés mesurés. Avec la génomique, il est possible et probable d'obtenir une précision déjà élevée uniquement par la connaissance d'un grand nombre de marqueurs génomiques répartis sur tous les chromosomes. Ainsi, à partir d'un effectif mesuré restreint, des indices génomiques fiables peuvent être calculés pour tout cheval génotypé. Les chevaux de l'échantillon SoGen ont été génotypés et la base de données des génotypes rassemble aujourd'hui près de 3000 chevaux de sport. Le calcul des indices génomiques est la prochaine étape.

Dans le cadre du projet SoGen, les allures de ces chevaux ont aussi été caractérisées par des mesures d'accélérométrie. A ces mesures se sont ajoutés les enregistrements d'accélération lors de l'épreuve de saut en liberté des concours d'élevage d'un millier de chevaux de 3 ans du projet CaractSF. Les notes de jugement lors de ces concours d'élevage sont aussi des données recueillies par le Stud Book Selle français. Les relations entre toutes ces mesures sont encore à découvrir.



## 7 Références

1. Pourcelot, P., Audigie, F., Lacroix, V., Denoix, J.M., Crevier-Denoix, N. 2002. A 3-D method to measure morphometrical data and standing conformation in horses. *28<sup>eme</sup> Journée de la Recherche Equine*, Paris, Les Haras nationaux.
2. Crevier-Denoix, N., Erlinger, D., Concordet, 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. *30<sup>eme</sup> Journée de la Recherche Equine*, Paris, Les Haras nationaux.
3. Ricard, A., Pourcelot, P., Erlinger, D., Lagache, C., Falala, S., Denoix, J.M., Crevier-Denoix, N. 2008. Heritability of morphological traits and genetic correlations between them measured by a 3D morphometric method. *Sixth International Conference on Equine Locomotion (ICEL 6)*, Cabourg, France, 16 to 19 June 2008.
4. Adams, D., Otárola-Castillo, E. 2013. Geomorph: an R package for the collection and analysis of geometric morphometric shape data. *Methods in Ecology and Evolution* 4, 393-399.
5. Gower, J.C. 1975. Generalized Procrustes analysis. *Psychometrika* 40(1), 33-51.
6. Rohlf, F.J., Slice, D. 1990. Extensions of the Procrustes method for the optimal superimposition of landmarks. *Syst. Zool.* 39(1), 40-59