



HAL
open science

Morphologie du jeune cheval d'endurance : recherche de critères associés à la performance et la longévité en compétition

Auxane Masse

► To cite this version:

Auxane Masse. Morphologie du jeune cheval d'endurance : recherche de critères associés à la performance et la longévité en compétition. Médecine vétérinaire et santé animale. 2023. dumas-04416938

HAL Id: dumas-04416938

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04416938>

Submitted on 25 Jan 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Année 2023

**MORPHOLOGIE DU JEUNE CHEVAL D'ENDURANCE :
RECHERCHE DE CRITÈRES ASSOCIÉS À LA
PERFORMANCE ET LA LONGÉVITÉ EN COMPÉTITION**

THÈSE

pour obtenir le diplôme d'État de

DOCTEUR VÉTÉRINAIRE

présentée et soutenue publiquement devant

la Faculté de Médecine de Créteil (UPEC)

le 19 décembre 2023

par

Auxane, Marine, Laure MASSE

sous la direction de

Céline ROBERT

JURY

Président du jury :	M. Loïc DESQUILBET	Professeur à l'EnvA
Directrice de thèse :	Mme Céline ROBERT	Professeur à l'EnvA
Examineur :	M. Henry CHATEAU	Professeur à l'EnvA

Liste des enseignants intervenant dans l'encadrement des thèses de Doctorat vétérinaire



version décembre 2023

Liste des Professeurs et Maîtres de conférences titulaires de l'HDR

M	Adjou	Karim	Professeur	DPASP	1
M	Audigié	Fabrice	Professeur	DEPEC	2
M	Bellier	Sylvain	Professeur	DSBP	3
Mme	Benckroun	Ghita	Maître de conférences HDR	DEPEC	4
M	Blaga	Radu	Professeur	DSBP	5
M	Blot	Stéphane	Professeur	DEPEC	6
M	Boulouis	Henri-Jean	Professeur émérite	DSBP	7
Mme	Chahory	Sabine	Professeur	DEPEC	8
Mme	Chastant	Sylvie	Professeur	DPASP	9
M	Chateau	Henry	Professeur	DSBP	10
Mme	Chetboul	Valerie	Professeur	DEPEC	11
Mme	Crevier-Denoix	Nathalie	Professeur	DSBP	12
M	Degueurce	Christophe	Professeur	DSBP	13
M	Denoix	Jean-Marie	Professeur	DEPEC	14
M	Desquilbet	Loic	Professeur	DSBP	15
Mme	Dufour	Barbara	Professeur émérite	DPASP	16
M	Eloit	Marc	Professeur	DSBP	17
M	Fayolle	Pascal	Professeur émérite	DEPEC	18
M	Federighi	Michel	Professeur	DPASP	19
M	Fontbonne	Alain	Professeur	DEPEC	20
Mme	Gilbert	Caroline	Professeur	DSBP	21
M	Grandjean	Dominique	Professeur	DEPEC	22
Mme	Grimard-Ballif	Bénédicte	Professeur	DPASP	23
Mme	Haddad-Hoang Xuan	Nadia	Professeur	DPASP	24
M	Jouvion	Gregory	Professeur	DSBP	25
M	Kohlhauer	Matthias	Professeur	DSBP	26
Mme	Le Poder	Sophie	Professeur	DSBP	27
Mme	Le Roux	Delphine	Maître de conférences HDR	DSBP	28
M	Manassero	Mathieu	Professeur	DEPEC	29
Mme	Maurey-Guéneq	Christelle	Professeur	DEPEC	30
M	Millemann	Yves	Professeur	DPASP	31
M	Ponter	Andrew	Professeur	DPASP	32
Mme	Risco-Castillo	Véronica	Maître de conférences HDR	DSBP	33
Mme	Rivière	Julie	Maître de conférences HDR	DPASP	34
Mme	Robert	Céline	Professeur	DSBP	35
M	Tiret	Laurent	Professeur	DSBP	36
M	Tissier	Renaud	Professeur	DSBP	37
M	Verwaerde	Patrick	Professeur	DEPEC	38
Mme	Viateau	Véronique	Professeur	DEPEC	39

Liste des Maîtres de conférences et Ingénieurs de recherche DMV

M	Arné	Pascal	Maître de conférences	DPASP	1
Mme	Barassin	Isabelle	Maître de conférences	DPASP	2
Mme	Barbarino	Alix	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC	3
Mme	Bertoni	Lelia	Maître de conférences	DEPEC	5
Mme	Canonne-Guibert	Morgane	Maître de conférences	DEPEC	7
Mme	Chevallier	Lucie	Maître de conférences	DSBP	8
Mme	Cochet-Faivre	Noëlle	Maître de conférences	DEPEC	9
Mme	Cordonnier-Lefort	Nathalie	Maître de conférences	DSBP	10
Mme	Coudry	Virginie	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC	11
Mme	Crepeaux	Guillemette	Maître de conférences	DSBP	12
M	Crozet	Guillaume	Maître de conférences	DPASP	13
Mme	De Paula Reis	Alline	Maître de conférences	DPASP	14
M	Delsart	Maxime	Maître de conférences	DPASP	15
Mme	Denis	Marine	Ingénieur de recherche (DMV)	DPASP	16
M	Deshuillers	Pierre	Maître de conférences	DSBP	17
M	Gauthier	Michel	Maître de conférences associé	DPASP	18
Mme	Guérin	Virginie	Maître de conférences	DSBP	19
Mme	Guétin-Poirier	Valentine	Maître de conférences	DPASP	20
Mme	Jacquet	Sandrine	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC	21
M	Kurtz	Maxime	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC	22
Mme	Lagrée	Anne-Claire	Maître de conférences	DSBP	23
Mme	Le Dudal	Marine	Ingénieur de recherche (DMV)	DSBP	24
Mme	Legrand	Chantal	Maître de conférences associé	DSBP	25
M	Mammeri	Mohamed	Maître de conférences	DSBP	26
Mme	Manguin	Estelle	Maître de conférences	DEPEC	27
Mme	Marignac	Genevieve	Maître de conférences	DSBP	28
Mme	Marotto	Stéphanie	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC	29
Mme	Maurice	Emeline	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC	31
Mme	Mespoules-Rivière	Céline	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC	32
Mme	Mtimet	Najès	Maître de conférences	DPASP	33
M	Mortier	Jérémy	Maître de conférences associé	DEPEC	34
M	Nudelmann	Nicolas	Maître de conférences	DEPEC	35
M	Pignon	Charly	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC	36
M	Polack	Bruno	Maître de conférences	DSBP	37
Mme	Quéré	Émilie	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC	38
Mme	Ravary-Plumioën	Bérangère	Ingénieur de recherche (DMV)	DPASP	39
M	Reyes-Gomez	Edouard	Maître de conférences	DSBP	40
Mme	Rose	Hélène	Maître de conférences associé	DSBP	41
M	Tanquerel	Ludovic	Maître de conférences	DEPEC	42

Remerciements

Au Président du Jury de cette thèse, M. Loïc DESQUILBET, Professeur à l'EnvA,

Qui m'a fait l'honneur d'endosser la présidence de ce jury de thèse,

Merci pour votre pédagogie,

Merci d'éclairer nos pas sur le chemin tumultueux des biostatistiques.

Au Docteur Céline ROBERT, Professeur à l'EnvA,

Qui m'a fait l'honneur de diriger cette thèse,

Merci pour votre temps, votre disponibilité et votre efficacité pour l'élaboration de ce travail,

Merci de m'avoir fait découvrir les courses d'endurance équestre « de l'intérieur ».

Au Docteur Henry CHATEAU, Professeur à l'EnvA,

Qui m'a fait l'honneur de participer à ce jury de thèse,

Merci pour votre temps.

Table des matières

Liste des figures.....	3
Liste des tableaux.....	5
Liste des abréviations.....	9
Introduction.....	11
Première partie : Bibliographie.....	13
1. L'endurance équestre, une discipline historique et universelle.....	13
A. <i>Une discipline de guerre</i>	13
B. <i>Une discipline utilitaire</i>	13
C. <i>Une discipline sportive</i>	14
D. <i>Une discipline internationale, bien représentée par la France</i>	14
a. L'endurance au sein de la FEI.....	15
b. La France, acteur majeur de l'endurance à l'international.....	15
E. <i>Les différents types d'épreuves actuelles (FEI, 2019 ; FFE, 2022b)</i>	17
a. Les épreuves de la FFE.....	17
b. Les épreuves internationales.....	18
c. Déroulement d'une course.....	19
d. Classement final.....	19
e. Motifs d'élimination.....	20
2. Le cheval d'endurance : un athlète.....	22
A. <i>Rappels physiologiques de l'effort physique appliqué à l'endurance</i>	22
a. Production d'énergie.....	22
b. Consommation des substrats (McMiken, 1983).....	23
c. Elimination des déchets métaboliques.....	25
d. Consommation énergétique et travail mécanique.....	25
B. <i>Thermorégulation</i>	27
a. Production de chaleur lors de l'effort.....	27
b. Modes de dissipation de la chaleur.....	28
C. <i>Indices d'évaluation des performances (Depuille, 2017 ; Ricard et al., 2021)</i>	30
a. Indice global de carrière : IRE.....	30
b. Indice génétique : BRE.....	31
3. Critères d'évaluation et qualités recherchées pour la performance du cheval d'endurance ..	33
A. <i>Caractéristiques intrinsèques : race, âge, sexe et mental</i>	33
a. Race.....	33
b. Âge.....	33
c. Sexe.....	34
d. Mental.....	34
B. <i>Caractéristiques physiologiques et améliorations par l'entraînement</i>	35
a. Capacité aérobie.....	35
b. Tolérance à l'exercice et pouvoir de récupération.....	38
C. <i>Caractéristiques physiques</i>	40
a. Morphologie du cheval d'endurance.....	40
b. Appréciation esthétique du cheval Arabe.....	42
D. <i>Approche sélective pour l'amélioration des performances en endurance</i>	43
a. L'héritabilité, notion centrale de la sélection génétique.....	43
b. L'héritabilité des performances équestres.....	43
c. L'héritabilité des performances en endurance.....	44
d. Intérêts de l'étude des jeunes chevaux.....	44
e. A la recherche d'autres critères associés à la performance et d'héritabilité plus élevée.....	45
f. Relation entre la conformation et indices de performance en endurance.....	46
Deuxième partie : étude expérimentale.....	49
1. Introduction.....	49
2. Matériels et méthodes.....	49

A. Population de l'étude.....	49
B. Protocole expérimental	50
a. Données d'identité individuelles.....	50
b. Données morphologiques	50
c. Mesures photométriques.....	52
d. Variables morphologiques et morphométriques calculées	58
e. Résultats individuels à long terme dans la discipline d'endurance.....	59
C. Traitement des données et analyse des résultats	60
3. Résultats	61
A. Caractéristiques des chevaux de l'étude	61
a. Âge.....	61
b. Sexe.....	61
c. Race.....	62
B. Etude descriptive des données morphologiques et morphométriques.....	63
a. Mensurations	63
b. Poids	65
c. Note d'état corporel.....	65
d. Mesures photométriques.....	66
e. Rapports, surfaces, et indices calculés	68
f. Performance et contre-performance	69
C. Etude analytique : relations entre les paramètres morphologiques et la performance	73
a. Relation entre la morphologie et les indices de performance en endurance.....	73
b. Relation entre la morphologie et la catégorie de performance en endurance	78
c. Relation entre la morphologie et la longévité en compétition	82
d. Relation entre la morphologie et la participation aux compétitions d'endurance de haut niveau	84
4. Discussion.....	88
A. Limites de la méthodologie	88
a. Significativité des résultats.....	88
b. Amélioration du protocole de l'étude.....	89
c. Réduction des biais.....	93
B. Apports de notre étude	95
a. Données d'intérêt concernant le format des chevaux	95
b. Données d'intérêt concernant les mensurations des chevaux	98
c. Sélection de variables d'intérêt selon leurs coefficients de corrélation avec l'IRE	103
C. Perspectives.....	104
Conclusion.....	107
Liste des références bibliographiques	109
Annexe 1 : Grille de notation SHF	117
Annexe 2 : Corrélations avec les quatre indices de performance	119
Annexe 3 : Catégories d'indices IRE.....	125
Annexe 4 : Longévité de carrière	127
Annexe 5 : Compétiteurs de haut niveau.....	129

Liste des figures

Figure 1 : Classement 2022 des disciplines de la FEI selon le nombre de compétitions organisées (en haut), le nombre de cavaliers licenciés (en bas à gauche) et le nombre de chevaux enregistrés (en bas à droite) (FEI, 2022).....	15
Figure 2 : Proportion des différentes voies métaboliques impliquées dans l'effort dans différentes disciplines équestres	22
Figure 3 : Représentation schématique de la voie métabolique aérobie (Tribout, 2013).....	23
Figure 4 : Mise en jeu des trois filières du métabolisme énergétique et mobilisation des substrats énergétiques en fonction de l'intensité de l'effort pratiqué.....	23
Figure 5 : Comparaison des surfaces corporelles relatives au poids chez l'Homme (a) et chez le cheval (b) (Art <i>et al.</i> , 2000)	27
Figure 6 : Mécanismes d'échanges thermiques entre un cheval et son environnement lors d'un effort (Lienhart, 2016).....	28
Figure 7 : Schéma simplifié des mécanismes de thermorégulation mis en jeu lors d'un effort d'endurance en milieu tempéré (Lienhart, 2016).....	29
Figure 8 : Schéma de la répartition théorique des pourcentages de chevaux sortis en compétition par rapport à la valeur de leur indice de performance.....	31
Figure 9 : Schéma de la répartition théorique des pourcentages de chevaux sortis en compétition par rapport à la valeur de leur indice génétique (Source personnelle)	32
Figure 10 : Schéma des différentes mesures morphologiques effectuées sur les chevaux de l'étude	50
Figure 11 : Régions corporelles d'intérêt dans la notation et caractérisation de l'état corporel.....	51
Figure 12 : Photographie légendée des repères placés avec des gommettes (Barrey, 2002).....	52
Figure 13 : Photographie légendée illustrant les marqueurs placés via le logiciel EQUIMETRIX (Barrey 2002)	53
Figure 14 : Photographies légendées des variables de taille et de la ligne du dessus	55
Figure 15 : Photographies légendées des variables morphologiques des lignes antérieure et postérieure	57
Figure 16 : Répartition des chevaux de l'étude selon leur âge lors des mesures	61
Figure 17 : Répartition des chevaux de l'étude selon leur sexe	61
Figure 18 : Répartition des races des chevaux de l'échantillon.....	62
Figure 19 : Distribution des 482 chevaux en fonction de leur taille au garrot	63

Figure 20 : Distribution des 485 chevaux en fonction de leur périmètre thoracique	63
Figure 21 : Distribution des 485 chevaux en fonction de leur longueur corporelle.....	64
Figure 22 : Distribution des 449 chevaux en fonction de l'épaisseur de leur pli cutané	64
Figure 23 : Distribution des 436 chevaux pesés en fonction de leur poids	65
Figure 24 : Répartition des notes d'état corporel attribuées aux chevaux de l'étude	65
Figure 25 : Distribution des quatre indices de performances dans l'échantillon étudié.....	69
Figure 26 : Distribution (pourcentages et effectifs) des chevaux indicés selon leur catégorie de performance, par classe d'âge	70
Figure 27 : Représentation des pourcentages et effectifs de chevaux, pour chaque classe d'âge, selon leur classe de compétition à haut niveau	72
Figure 28 : Bilan des corrélations significatives obtenues entre les variables morphologiques (à gauche) et morphométriques (à droite) relatives au format, avec les indices de performance des chevaux de notre échantillon classés par âge	95
Figure 29 : Bilan des différences significatives obtenues entre les variables morphologiques et morphométriques, selon la durée de carrière (à gauche) et la compétition à haut niveau (à droite) des chevaux de notre échantillon classés par âge.....	95
Figure 30 : Bilan des corrélations et différences significatives obtenues entre les variables de poids et surfaces, avec les indices de performance et la compétition à haut niveau, chez les chevaux de notre échantillon classés par âge	97
Figure 31 : Bilan des corrélations significatives obtenues entre les variables de mensuration de la ligne du dos, avec les indices de performance chez les chevaux de notre échantillon classés par âge	98
Figure 32 : Bilan des corrélations et différences significatives obtenues entre les variables de mensuration de la ligne des antérieurs, avec les indices de performance et la compétition à haut niveau chez les chevaux de notre échantillon classés par âge	99
Figure 33 : Bilan des corrélations et différences significatives obtenues entre les variables de mensuration de la ligne des postérieurs, avec les indices de performance (à gauche), la compétition à haut niveau (au milieu) et la longévité de carrière (à droite) chez les chevaux de notre échantillon classés par âge	101

Liste des tableaux

Tableau 1 : Effectifs et proportions des trois pays majoritairement impliqués dans chacune des trois disciplines équestres les plus représentées à l'international, en nombre d'événements, de cavaliers licenciés et de chevaux inscrits (FEI, 2022).....	16
Tableau 2 : Epreuves d'endurance réglementées par la FFE par catégories, avec vitesse, distance à parcourir en un ou plusieurs jour(s), et nombre de contrôles vétérinaires intermédiaires obligatoires (traits verticaux pleins) et facultatifs (traits verticaux pointillés)	17
Tableau 3 : Epreuves d'endurance internationales réglementées par la FEI, avec vitesse, distance à parcourir en un ou plusieurs jour(s), et nombre de contrôles vétérinaires intermédiaires obligatoires (traits verticaux pleins) et facultatifs (traits verticaux pointillés)	18
Tableau 4 : Répartition moyenne des différents types de fibres dans des biopsies de muscle fessier moyen chez différentes races (Couroucé A., 2022 ; Tribout, 2013)	26
Tableau 5 : Estimation des héritabilités de traits morphologiques dans plusieurs échantillons de chevaux Arabes ou croisés Arabes	45
Tableau 6 : Bilan des corrélations significatives et tendances entre la conformation et les indices de performance chez le cheval Arabe jeune et adulte (Tribout, 2013 ; Triquenaux, 2015).....	46
Tableau 7 : Nom, description, et unité de chaque variable morphométrique	54
Tableau 8 : Suite de Nom, description, et unité de chaque variable morphométrique	56
Tableau 9 : Nom et description des rapports morphométriques étudiés	59
Tableau 10 : Valeurs minimale, maximale, moyenne et écart-type ou médiane et interquartile de chaque variable morphométrique mesurée de taille, ligne du dessus et ligne du dos	66
Tableau 11 : Suite du tableau 4 des valeurs minimale, maximale, moyenne et écart-type ou médiane et interquartile des variables morphométriques mesurées sur les antérieurs et les postérieurs	67
Tableau 12 : Valeurs minimale, maximale, moyenne et écart-type ou médiane et interquartile de chaque variable morphométrique calculée	68
Tableau 13 : Valeurs minimale, maximale, moyenne et écart-type des indices de performance dans l'échantillon d'étude	69
Tableau 14 : Valeurs minimale, maximale, médiane et intervalle interquartile de l'âge de fin de carrière par classe d'âge à la prise des mesures.....	71
Tableau 15 : Effectifs et pourcentages associés des chevaux avec indices, selon leur âge et leur durée de carrière	71
Tableau 16 : Effectifs et pourcentages associés des différents motifs d'absence d'indice de performance 2019, parmi les chevaux sans indice, par classe d'âge.....	72

Tableau 17 : Résultats des tests statistiques de corrélation de Pearson ou Spearman entre les variables morphologiques chez les chevaux de 4 ans et leurs indices de performances	73
Tableau 18 : Résultats des tests statistiques de corrélation de Pearson ou Spearman entre les variables morphologiques chez les chevaux de 5 ans et leurs indices de performance	74
Tableau 19 : Résultats des tests statistiques de corrélation de Pearson ou Spearman entre les variables morphologiques chez les chevaux de 6 ans et leurs indices de performance	74
Tableau 20 : Résultats significatifs des corrélations de Pearson entre les variables morphométriques mesurées et les indices de performance, par classe d'âge.....	75
Tableau 21 : Résultats significatifs des corrélations de Pearson entre les variables morphométriques calculées et les indices de performance, par classe d'âge.....	76
Tableau 22 : Moyennes des paramètres morphologiques présentant une différence significative entre les groupes de valeur d'IRE et par classe d'âge	79
Tableau 23 : Moyennes des variables morphométriques présentant une différence significative entre les groupes de valeur d'IRE et par classe d'âge	80
Tableau 24 : Moyennes des variables morphométriques calculées présentant une différence significative entre les groupes de valeur d'IRE et par classe d'âge	81
Tableau 25 : Moyennes des variables morphométriques significativement différentes selon le test de Student entre les groupes de durée de carrière parmi les chevaux indicés et classés par âge.....	82
Tableau 26 : Résultats significatifs des tests de Student sur les moyennes des variables morphologiques entre les chevaux compétiteurs ou non, par classe d'âge.....	85
Tableau 27 : Résultats significatifs de test de comparaison des moyennes (Student) ou médianes (Mann-Whitney Wilcoxon) des variables morphométriques entre les chevaux compétiteurs ou non, pour chaque classe d'âge.....	86
Tableau 28 : Résultats significatifs des tests de comparaison des moyennes (Student) ou médianes (Mann-Whitney Wilcoxon) des variables morphométriques calculées entre les groupes de compétiteurs de haut niveau, par classe d'âge	87
Tableau 29 : Sélection de 16 variables morphologiques et morphométriques dont l'intérêt pour l'analyse de corrélation avec la performance est justifié dans la bibliographie	90
Tableau 30 : Résultats des tests statistiques de corrélation de Pearson ou Spearman entre les variables morphologiques ou morphométriques sélectionnées et l'IRE, sur l'échantillon total de 470 chevaux, avec correction de Hölm.....	92
Tableau 31 : Variables morphologiques sélectionnées par rapport à leurs coefficients de corrélation obtenus avec l'IRE, dans notre étude, par classe d'âge	103
Tableau 32 – Annexe 2-A : Résultats des tests des corrélations de Pearson ou Spearman pour toutes les variables de morphologie chez les chevaux de 4 ans (n = 53).....	119
Tableau 33 - Annexe 2-B : Résultats des tests des corrélations de Pearson ou Spearman pour toutes les variables de morphologie chez les chevaux de 5 ans (n = 100)	121

Tableau 34 - Annexe 2-C : Résultats des tests des corrélations de Pearson ou Spearman pour toutes les variables de morphologie chez les chevaux de 6 ans (n = 174)	123
Tableau 35 – Annexe 3 : Résultats des analyses de variances GLM sur les paramètres morphologiques et morphométriques des chevaux selon leur catégorie d'indice IRE, par classe d'âge	125
Tableau 36 - Annexe 4 : Résultats des tests de Student ou Mann-Whitney Wilcoxon pour les variables morphologiques et morphométriques entre les groupes de durée de carrière par rapport à l'âge de dix ans, par classe d'âge à la prise des mesures	127
Tableau 37 - Annexe 5 : Résultats des tests de Student ou Mann-Whitney Wilcoxon pour les variables morphologiques et morphométriques entre les groupes de compétiteurs de haut niveau ou non, par classe d'âge	129

Liste des abréviations

ACA = Association nationale française du Cheval Arabe
ACAP = Association des éleveurs et amateurs du Cheval Arabe Pur-sang
ADP = Adénosine diphosphate
ATP = Adénosine triphosphate
BLUP = Best Linear Unbiased Prediction
BRE = BLUP en Raid d'Endurance
CCE = Concours Complet d'Equitation
CD = Coefficient de Détermination
CEI = Concours de raid d'Endurance International
CEIO = Concours de raid d'Endurance International Officiel
CEN = Concours d'Endurance National
CEI = Concours d'Endurance International
CNREE = Comité National des Raids Equestres d'Endurance
CSO = Concours de Saut d'Obstacle
DSA = Demi-Sang Arabe
EAU = Emirats-Arabe Unis
FEI = Fédération Equestre Internationale
FFE = Fédération Française d'Equitation
GML = Generalized Linear Model, ou modèle linéaire généralisé
HG = Hauteur au Garrot
IFCE = Institut Français du Cheval et de l'Equitation
INRAE = Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement
INSERM = Institut National de la Santé Et de la Recherche Médicale
IRE = Indice en Raid d'Endurance
IC = Indice Corporel
IS = Indice Surfaccique
LC = Longueur Corporelle
NEC = Note d'Etat Corporel
SAA = Sérum Amyloïde A
SIRE = Système d'Information Relatif aux Equidés
SHF = Société Hippique Française
SD = Standard Déviation, ou écart-type
PC = Pli Cutané
PT = Périmètre Thoracique

Introduction

L'endurance équestre est une discipline sportive largement pratiquée et en constante évolution (FEDERATION FRANCAISE D'EQUITATION, 2022a). Elle consiste en parcourir de longues distances le plus vite possible, en préservant le mieux l'état de santé du cheval. En 2022, l'endurance est la troisième discipline la plus pratiquée dans le monde, et la France en est le premier représentant (FEDERATION EQUESTRE INTERNATIONALE, 2022). L'élevage français de chevaux d'endurance est historique, confirmé, et a fait ses preuves sur les podiums internationaux. Les acteurs de la filière sont soucieux d'améliorer en permanence leurs chevaux, et les éleveurs requièrent des lignes directrices pour la sélection des chevaux.

Le projet GenEndurance est né en 2011 de la collaboration de trois équipes de recherches : l'équipe de Biologie Intégrative et Génomique Equine du laboratoire GABI à l'INRAE Jouy-en-Josas, l'École Nationale Vétérinaire d'Alfort (ENVA) et l'Unité de Biologie Intégrative des Adaptations à l'Exercice à l'INSERM Génomole d'Evry. Son but était de développer des outils de sélection précoces et efficaces des chevaux d'endurance, pour les intégrer dans un plan de sélection des chevaux d'endurance, en coordination avec l'Association nationale française du Cheval Arabe (ACA). Ce projet visait à identifier des biomarqueurs et déterminants génétiques spécifiques de la performance pour ordonner la sélection et caractériser génétiquement l'aptitude de jeunes chevaux pour l'endurance.

Dans ce contexte, plusieurs études ont cherché à identifier des paramètres morphologiques associés à la performance chez le cheval Arabe ou croisé Arabe. Tribout (2013) s'est intéressée à l'existence de paramètres morphologiques associés à la performance chez l'adulte et Triquenaux (2015) aux paramètres morphologiques du jeune cheval, associés aux performances précoces. Notre étude vient compléter ces travaux en mettant en relation la morphologie des jeunes chevaux avec leurs performances sur toute leur carrière et leur longévité en compétition. Elle se penche sur les questions suivantes : existe-t-il une conformation favorable à la performance en endurance, que les éleveurs pourraient repérer chez leurs chevaux dès le plus jeune âge ? Les critères morphologiques liés à la performance mis en évidence par Triquenaux (2015) sur les jeunes chevaux sont-ils indicatifs des performances futures ?

Tout d'abord, notre travail consiste en une partie bibliographique qui présente la discipline, expose les enjeux autour du cheval d'endurance perçu comme un athlète, puis fait le point sur les qualités attendues d'un cheval d'endurance en illustrant les caractéristiques de conformation pour lesquelles un lien avec la performance a déjà été mis en évidence dans la littérature. Notre travail porte ensuite sur une étude expérimentale qui recherche, chez les jeunes chevaux d'endurance, des critères morphologiques éventuellement liés à leur performance à long terme et à la longévité de leur carrière.

Première partie : Bibliographie

1. L'endurance équestre, une discipline historique et universelle

De l'utilisation guerrière au loisir sportif, le cheval a accompagné l'Homme à travers toutes les époques et tous les territoires.

A. Une discipline de guerre

Le premier raid guerrier rapporté, à l'origine de l'endurance équestre, date d'environ -1700 av. JC avec l'invasion de l'Égypte par les Hyksos, venus d'Asie via la Syrie. Les chevaux alors importés permettent aux populations nouvellement nomades de parcourir de très longues distances (Roche, 2022).

Cette cavalerie légère et endurante, faite de petits chevaux réputés infatigables, maniables et adaptés à un environnement rude, se distingue par sa supériorité face à la cavalerie lourde chrétienne au VIII^e siècle lors de la bataille de Poitiers contre les Maures, et au cours des croisades au Moyen-Orient (Roche, 2022).

Bien plus tard, en 1806, Napoléon restaure les Haras et fait importer des chevaux de race Arabe d'Égypte pour alléger sa cavalerie. Il promeut alors le développement de la race en pure et en améliorateur de race (Vial, 2012).

B. Une discipline utilitaire

En parallèle des activités guerrières, l'endurance des petits chevaux robustes est aussi mise à contribution pour la communication avec les systèmes de poste à relais. Les premières traces écrites datent du III^e siècle, en Chine, et leur modèle d'organisation est exporté de proche en proche à travers la Mongolie, la Syrie, jusqu'en Europe au XIV^e siècle (Gazagnadou, 1993). Les chevaux sont d'abord utilisés par binômes, l'un étant monté, l'autre portant la cargaison de courrier, et des distances d'environ 20 km sont parcourues au galop. Les diligences sont par la suite privilégiées pour des raisons de confort et de volume transportable.

L'idée d'alléger la cavalerie pour faire acheminer le courrier plus rapidement, par des cavaliers individuels, et sur de plus longues distances, émerge outre-Atlantique en avril 1860, et donne naissance au Pony-express. Jusqu'en octobre 1861, des cavaliers parcourent chacun 125 km au petit galop et se relaient en 190 points sur un parcours de 3 150 km reliant les États du Missouri et de la Californie. Les difficultés financières rencontrées et l'apparition du télégraphe révolutionnant les modes de communication mettront fin au projet, qui résonne cependant comme l'un des événements précurseurs de la discipline aux États-Unis d'Amérique (Charles River Editors, 2017).

C. Une discipline sportive

D'abord dédiés à l'entraînement des militaires, il fallut plusieurs dizaines d'années pour que les raids trouvent une dimension sportive. En 1892, le premier raid militaire sportif de Berlin-Vienne est organisé avec un parcours de 120 km par jour pendant cinq jours consécutifs (Ancelet, 2014). De nombreux chevaux décèdent au cours ou à la suite de cette course en raison du manque de connaissances de la physiologie de l'effort et de l'absence de surveillance de la santé des chevaux mais, déjà, les chevaux légers, près du sang et orientaux, se distinguent dans la discipline. Dans les années 1920, la participation à ces raids est ouverte aux cavaliers civils.

Le lancement de la Tevis Cup Ride, une course de 100 miles (160 km), organisée annuellement depuis 1955 aux Etats-Unis, marque le début de l'endurance sportive telle qu'on la connaît aujourd'hui. La discipline atteint le Sud de la France en 1975 avec l'émergence du premier raid, sur 160km, le raid de Florac. Lors de l'édition 1979, trois chevaux meurent à l'issue de la course et ces « incidents de Florac » motiveront le « Comité National des Raids Equestres d'Endurance » (CNREE, créé en 1975) à imposer dès 1980 des épreuves qualificatives pour écarter de la participation aux raids nationaux les couples cheval/cavalier non préparés. Dès lors, les contrôles vétérinaires n'ont cessé de se développer pour protéger davantage les chevaux.

En parallèle du développement de la discipline, l'Association des éleveurs et amateurs du Cheval Arabe Pur-sang (ACAP, créée elle aussi en 1975), qui deviendra l'actuelle Association nationale française du Cheval Arabe (ACA) s'engage dans le développement de la filière d'élevage du cheval typique d'endurance, celui de race Arabe.

La Fédération Française d'Equitation (FFE, créée en 1987), récupère la gestion de la discipline endurance à la dissolution de la CNREE au début des années 2000. En France, en 2022, l'endurance est la 6^e discipline en nombre d'épreuves organisées par la FFE, et la 5^e en nombre de cavaliers licenciés (FEDERATION FRANCAISE D'EQUITATION, 2022b).

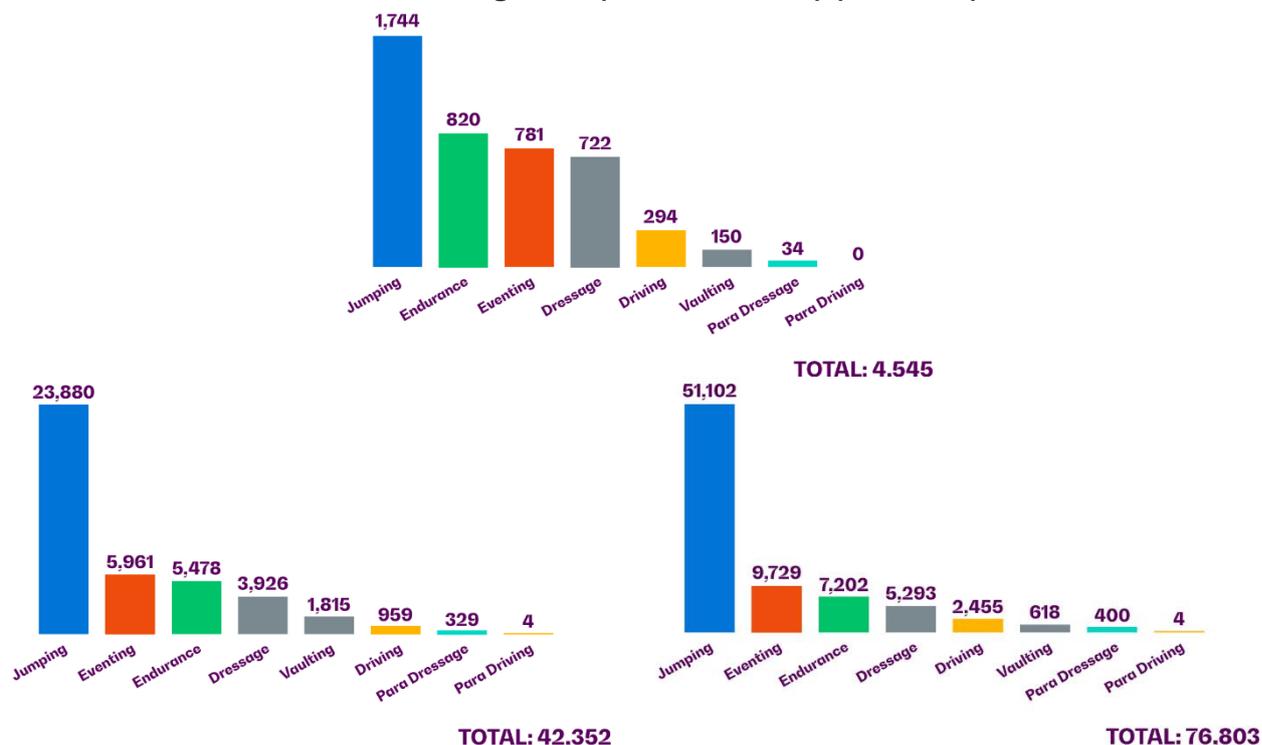
D. Une discipline internationale, bien représentée par la France

La Fédération Equestre Internationale (FEI) est créée en 1921 à Lausanne, en Suisse, initialement pour réguler les compétitions internationales des disciplines olympiques, à savoir le Concours de Saut d'Obstacle (CSO), le Dressage et le Concours Complet d'Equitation (CCE). C'est en 1982 que l'Endurance est ajoutée aux disciplines gérées par la FEI, actuellement au nombre de neuf. Son rôle est de promouvoir, réguler et administrer les compétitions internationales que sont les Jeux Equestres Mondiaux, les Championnats du Monde, les Jeux Olympiques, et les Championnats d'Europe.

a. L'endurance au sein de la FEI

L'endurance équestre s'est rapidement développée dans la sphère internationale, et, en 2022, elle représente la 2^e discipline de la FEI en termes de nombre de compétitions organisées, derrière le CSO, et la 3^e discipline en nombre de cavaliers licenciés et de chevaux enregistrés, derrière le CSO et le Concours Complet d'Equitation (FEDERATION EQUESTRE INTERNATIONALE, 2022)

Figure 1 : Classement 2022 des disciplines de la FEI selon le nombre de compétitions organisées (en haut), le nombre de cavaliers licenciés (en bas à gauche) et le nombre de chevaux enregistrés (en bas à droite) (FEI, 2022)



b. La France, acteur majeur de l'endurance à l'international

D'après le détail du rapport annuel de la FEI sur l'année 2022, la France est non seulement l'acteur majeur de la première discipline équestre internationale qu'est le CSO ; mais elle a aussi un rôle fondamental en endurance équestre (tableau 1). En effet, c'est en France que se tient la plus grande proportion de compétitions internationales d'endurance, avec près d'une compétition sur sept (125 compétitions sur les 820 organisées par la FEI en 2022). La France, avec ses 668 cavaliers licenciés FEI en endurance, se place juste derrière l'Arabie Saoudite, qui en compte 692.

Concernant le cheptel de chevaux enregistrés à la FEI, ce sont les Emirats Arabes Unis (EAU) qui détiennent le record avec plus d'un cinquième (22,9 %) du total des chevaux d'endurance internationale. C'est 50 % de plus que la France, et trois fois plus que l'Espagne qui dispose du 3^e plus grand cheptel de chevaux d'endurance au niveau international.

On peut aussi apprécier l'ampleur de la discipline dans le monde Arabe si l'on compare la France, qui comptabilise moins de deux chevaux par cavalier au niveau international (1 137 pour 668), aux Emirats Arabes Unis, dont l'effectif est doublé (1 648 pour 435, soit près de 4 chevaux pour 1 cavalier à l'international).

Tableau 1 : Effectifs et proportions des trois pays majoritairement impliqués dans chacune des trois disciplines équestres les plus représentées à l'international, en nombre d'événements, de cavaliers licenciés et de chevaux inscrits (FEDERATION EQUESTRE INTERNATIONALE, 2022)

Classement des disciplines FEI en nombre de		
Evénements	Cavaliers	Chevaux
<i>Total : 4 545</i>	<i>Total : 42 352</i>	<i>Total : 76 803</i>
1 ^{re} : CSO		
1 744	23 880	51 102
France : 286 (16,4 %) Belgique : 205 (11,8 %) Italie : 147 (8,4 %)	France : 4 204 (17,6 %) Italie : 2 583 (10,8 %) Allemagne : 2 021 (8,5 %)	France : 8 792 (17,2 %) Allemagne : 6 267 (12,3 %) Belgique : 5 120 (10,0 %)
2 ^e : Endurance	2 ^e : CCE	
820	5 961	9 729
France : 125 (15,2 %) Espagne : 71 (8,7 %) Italie : 58 (7,1 %)	Grande-Bretagne : 1 205 (20,2 %) USA : 794 (13,3 %) France : 639 (10,7 %)	Grande-Bretagne : 2 421 (24,9 %) USA : 1 139 (11,7 %) Allemagne : 1 076 (11,1 %)
3 ^e : CCE	3 ^e : Endurance	
781	5 478	7 202
USA : 104 (13,3 %) Grande-Bretagne : 74 (9,5 %) Australie : 70 (9,0 %)	Arabie Saoudite : 692 (12,6 %) France : 668 (12,2 %) Italie : 446 (8,1 %)	UAE : 1 648 (22,9 %) France : 1 137 (15,8 %) Espagne : 599 (8,3 %)

Les effectifs observés en 2022 sont au niveau de ceux collectés en 2019, année durant laquelle l'endurance se plaçait en seconde position après le CSO, avec la France dans le trio de tête des pays investis dans la discipline, tous critères confondus. Entre temps, l'organisation des compétitions internationales a souffert de la crise sanitaire de 2020, puis la discipline de CCE, a connu un essor, jusqu'à dépasser l'Endurance sur l'échelle internationale, en nombre de cavaliers et chevaux.

E. Les différents types d'épreuves actuelles (FEDERATION EQUESTRE INTERNATIONALE, 2019 ; FEDERATION FRANCAISE D'EQUITATION, 2022b)

L'endurance équestre est une discipline pratiquée individuellement ou en équipe, et caractérisée par des épreuves d'extérieur, courues à vitesse imposée, régulée ou libre, sur un itinéraire balisé. Des examens vétérinaires, dont la fréquence varie selon la longueur de l'épreuve, valident la capacité du poney ou du cheval à poursuivre la course avec son cavalier sur la distance prévue.

a. Les épreuves de la FFE

Ces épreuves d'endurance sont ouvertes aux chevaux à partir de 4 ans. Il existe différents types d'épreuves en fonction de :

- la **distance** à parcourir : de moins de 10 km pour les plus courtes à 160 km en une journée pour les plus longues ;
- la **vitesse** à laquelle se déroule la course, qui peut être imposée (de 6-8 km/h à 12-16 km/h), ou libre, avec une valeur minimale de 12 km/h.

Les épreuves sont classées en trois catégories : le circuit club, le circuit amateur et le circuit international. Les catégories club et amateur sont réglementées par la FFE tandis que le circuit international est réglementé par la FEI.

Le tableau 2 présente les différentes catégories d'épreuves de niveau club, amateur et préparatoire, avec les distances et vitesses correspondantes.

Tableau 2 : Epreuves d'endurance réglementées par la FFE par catégories, avec vitesse, distance à parcourir en un ou plusieurs jour(s), et nombre de contrôles vétérinaires intermédiaires obligatoires (traits verticaux pleins) et facultatifs (traits verticaux pointillés)

Epreuves Club	Epreuves Préparatoires	Vitesse (km/h) Imposée	Distances
Initi'1		8	
Initi'2		10	3-10 km
Club A (+ Equipe)		8	
Club Poney A (+ Equipe)		10	10 km (par engagé)
Club 4 (+ Equipe)		6	
Club 3 (+ Equipe)		10	20 km (par engagé)
Club 2 (+ Duo)	Préparatoire 4		
Club 2 Spéciale		10	30 km
Club 1	Préparatoire 3		40 km
Club Elite	Préparatoire 2	12	60 km
		15	
Epreuves Amateur			
Amateur 4			20 km
Amateur 4 Spéciale		12	30 km
Amateur 3 (+ VR)		15	40 km
Amateur 2 (+ VR)		(16 en VR)	60 km
Amateur 1	Préparatoire 1	12	80 km
Amateur 1 VL			
Amateur 1 GP		Vitesse libre	100 km
Amateur Elite		>12	2 x 65 km 120 km
Amateur Elite GP			3 x 65 2 x 80 km 140-160 km

b. Les épreuves internationales

Au niveau international, la FEI organise plusieurs types de compétitions d'endurance :

- les Concours de Raid d'Endurance Internationaux (CEI), avec une classification individuelle ;
- les Concours de Raid d'Endurance Internationaux Officiels (CEIO), avec une classification individuelle et une classification par équipes, constituées de 3 à 5 couples d'une même nation ;
- les Jeux et Championnats, avec des classifications individuelle et par équipe, à l'exception des championnats de jeunes chevaux, pour lesquels la classification n'est qu'individuelle ;
- les Evénements Combinés Nationaux et Internationaux (CEN/CEI), de type Amateur 1 Grand Prix, organisé par la FFE et décrits plus haut.

Le niveau de chaque compétition est défini par un nombre d'étoiles (3* constituant le niveau le plus haut) et répond à des consignes spécifiques de circuit, notamment sur la distance possible par jour de compétition et le nombre minimal d'étapes. Ces consignes sont schématisées dans le tableau 3.

Tableau 3 : Epreuves d'endurance internationales réglementées par la FEI, avec vitesse, distance à parcourir en un ou plusieurs jour(s), et nombre de contrôles vétérinaires intermédiaires obligatoires (traits verticaux pleins) et facultatifs (traits verticaux pointillés)

Epreuves Internationales	Vitesse (km/h) libre	Distances			
CEI*	 > 12				 100–119 km
CEI**			2 x  70–89 km		 120–139 km
CEI***			3 x  70–89 km	2 x  90–100 km	

Une modification du règlement appliquée à partir de juillet 2020 impose désormais que, pour se qualifier sur des courses de niveau 2* et 3*, chaque cheval et cavalier doit se qualifier lors d'au minimum deux participations sur trois dans la catégorie de compétition inférieure (respectivement 1* et 2*).

c. Déroulement d'une course

Chaque course est divisée en une ou plusieurs étapes (aussi appelées boucles) de 20 à 40 km, entre lesquelles le couple cheval/cavalier doit passer un contrôle vétérinaire. Ce contrôle permet, d'une part, d'évaluer la capacité du couple à continuer la course et, d'autre part, de recueillir des données qui pourront être utilisées dans le classement final. Les épreuves sont ainsi interrompues par un temps de repos obligatoire, entre chaque boucle, variant de 40 minutes à une heure selon le niveau d'épreuve et le moment de la course.

- **Contrôles vétérinaires**

Selon l'épreuve courue, le chronomètre s'arrête soit au franchissement de la ligne d'arrivée (finale ou de la boucle), soit au franchissement de l'entrée dans la zone de contrôle vétérinaire, ou « vet-gate ». Dans chacun des cas, un délai maximal est imposé au couple pour se présenter sur l'aire vétérinaire : il est par exemple de 20 minutes en Club 1 contre 15 minutes en Amateur 2 à vitesse régulée.

Le vétérinaire effectue alors un examen clinique strict du cheval en transcrivant les données récoltées sur une fiche individuelle de suivi, puis juge les allures sur un aller-retour au trot, en main, sur 30 à 40 mètres.

d. Classement final

Le classement d'un couple implique que celui-ci est qualifié, c'est-à-dire qu'il finit la course et valide l'ensemble des contrôles vétérinaires. Pour les épreuves à vitesse imposée, le classement se fait sur les couples qualifiés avec le calcul suivant :

$$\frac{[(Vitesse\ moyenne \times 2) - Vitesse\ minimale]}{Fréquence\ cardiaque\ finale} \times 100$$

Si la vitesse maximale autorisée est dépassée de plus de 0,50 km/h, alors le couple est éliminé. Si la vitesse maximale autorisée est dépassée de 0,01 à 0,50 km/h au maximum, alors on pénalise le couple à la hauteur du dépassement de la vitesse dans le calcul des points en adaptant la formule comme suit :

$$\frac{[((Vitesse\ maximale\ autorisée - Dépassement) \times 2) - Vitesse\ minimale]}{Fréquence\ cardiaque\ finale} \times 100$$

Exemple : un couple court une Club 2 Spéciale, sa vitesse moyenne sur la course est de 14,5 km/h et sa fréquence cardiaque à l'arrivée est de 48 bpm, alors son résultat sera de $[(14 \times 2) - 10] \times 100 / 48 = 37,5$.

Pour les épreuves à vitesse libre, le classement est effectué par ordre de temps écoulé pour finir la course, du plus petit au plus grand, sous réserve de respect de toutes les obligations spécifiques à la course (fréquence cardiaque inférieure au maximum autorisé, respect du temps de présentation au vet-gate, non dépassement d'une vitesse maximale même sur une seule boucle, etc...).

En cas d'ex aequo, c'est la fréquence cardiaque mesurée à l'arrivée qui départage, en privilégiant le couple dont la fréquence cardiaque est la plus basse.

e. Motifs d'élimination

En parallèle des abandons qui ont lieu à la demande des cavaliers sur le parcours, des éliminations sont possibles à chaque contrôle vétérinaire en cas de présence de trouble locomoteur, de trouble métabolique, ou de non-présentation dans le temps imparti au contrôle vétérinaire. Deux types de critères sont évalués aux contrôles vétérinaires.

- *Critères de type A*

Parmi les critères de type A, directement mesurables, on distingue :

- une fréquence cardiaque strictement supérieure à 64 battements par minute à l'issue du temps de récupération imparti par le règlement de l'épreuve (allant de 15 à 30 minutes) ;
- une fréquence respiratoire élevée associée à une température rectale supérieure ou égale à 39,5°C.

Le non-respect d'un seul de ces deux critères témoigne d'une difficulté de récupération du cheval, avec des signes de fatigue, voire de souffrance, et entraîne l'élimination immédiate du couple, à l'appréciation d'un seul vétérinaire.

- *Critères de type B*

Parmi les critères de type B, qualitatifs, s'évaluent notamment :

- la présence de boiterie, qui peut mener à une élimination « Boiterie » si elle est constante sur un aller-retour au trot de 30 à 40 mètres.
- la présence d'une déshydratation avec un pli de peau persistant, le temps de réplétion capillaire, la couleur des muqueuses, les bruits digestifs, les bruits cardiaques ou mouvements respiratoires anormaux, et la présence de plaie ou blessure susceptible d'engendrer une souffrance pendant la suite de la course. L'anomalie d'un ou plusieurs de ces derniers critères peut mener à une élimination Métabolique.

- *Décision vétérinaire*

Pour les courses à vitesse imposée, l'appréciation d'un seul vétérinaire est suffisante à l'élimination d'un couple, sur la base des critères A et/ou B, tandis que deux vétérinaires doivent se positionner lorsqu'il est question de l'élimination d'un couple courant à vitesse libre. Dans la pratique, les vétérinaires se constituent en jury de trois voix et votent à la majorité pour l'élimination ou la poursuite du couple en course.

- *Les éliminations en proportions*

Une étude rétrospective réalisée sur 7 032 départs à des courses nationales et internationales de 80 à 160 km déroulées entre 2007 et 2011 dans quatre pays différents révèle que 39 % des partants sont éliminés. Sur l'ensemble des quatre pays étudiés, le motif de boiterie compte pour 64 % des éliminations contre 15 % pour des raisons métaboliques (Younes *et al.*, 2015). Ces résultats confirment que la boiterie est le motif majoritaire d'élimination dans chacun des quatre pays étudiés, comme décrit précédemment sur un ensemble de 30 741 départs en courses internationales dans 47 pays (Nagy *et al.*, 2014a).

Cette étude de Younes *et al.* met aussi en évidence que le taux d'élimination métabolique est significativement plus élevé aux Emirats Arabes Unis en comparaison aux pays européens étudiés. Cela peut s'expliquer par le fait qu'un sol profond ou sableux est un facteur de risque d'élimination pour trouble métabolique (Nagy *et al.*, 2014b), puisqu'il semble participer au syndrome d'épuisement équin. Cette particularité semble toujours d'actualité au regard des résultats des Jeux Equestres Mondiaux de 2023 organisés à Butheeb (EAU) : parmi les 122 participants à la course de 160km, près de 65% sont éliminés, parmi lesquels 59 % pour motif de boiterie et 30 % pour motif métabolique (FEI 2023).

L'endurance est une discipline mobilisant tout l'organisme des chevaux pendant l'effort, notamment à haut niveau, et constitue ainsi une activité à risque pour ces chevaux athlètes.

Cependant, il existe dans certains pays comme en Uruguay, des compétitions d'endurance dont le règlement n'est pas aussi étoffé que celui de la FEI. Les conditions de participation aux « Raid Hipico Uruguayo » incluent un poids minimal du cavalier de 85kg et un unique contrôle vétérinaire aux deux-tiers de la course (FEDERACIÓN ECUESTRE URUGUAYA, 2023). Des chevaux inexpérimentés sont engagés sur des courses « courtes » de 60 km et des courses « longues » de 80 à 115 km, à des vitesses moyennes respectives de 28 et 30 km/h. Une étude alarmiste réalisée sur les résultats de ces courses de 2007 à 2018 révèle un taux de décès de près 6 pour 1 000 chevaux partants, plus fréquemment par mort subite sur les courses courtes, mais plutôt par accident (fracture) ou par atteinte de syndromes d'altérations métaboliques morbides sur les longues courses (Brito *et al.*, 2023).

L'évolution des règlements des compétitions FFE et FEI, avec l'obligation d'un couple à se qualifier sur des épreuves nationales avant de participer à des épreuves internationales, la régularité des contrôles vétérinaires, et la lutte contre les pratiques de dopage, s'inscrivent dans une démarche de préservation des chevaux des situations de souffrance et de mal-être, régulièrement impliquées dans le décès de chevaux en course ou à proximité immédiate de la course. L'entraînement, la connaissance et la vigilance des cavaliers et entraîneurs sont la première barrière de défense du bien-être des chevaux d'endurance dans le cadre des performances d'athlètes qui leur sont demandées.

2. Le cheval d'endurance : un athlète

A. Rappels physiologiques de l'effort physique appliqué à l'endurance

Lors d'un effort de course, le travail de contraction musculaire nécessite une grande quantité d'énergie, qui est issue de la déphosphorylation de l'adénosine triphosphate (ATP) par lyse enzymatique en adénosine diphosphate (ADP) et phosphate inorganique, à partir de différents substrats.

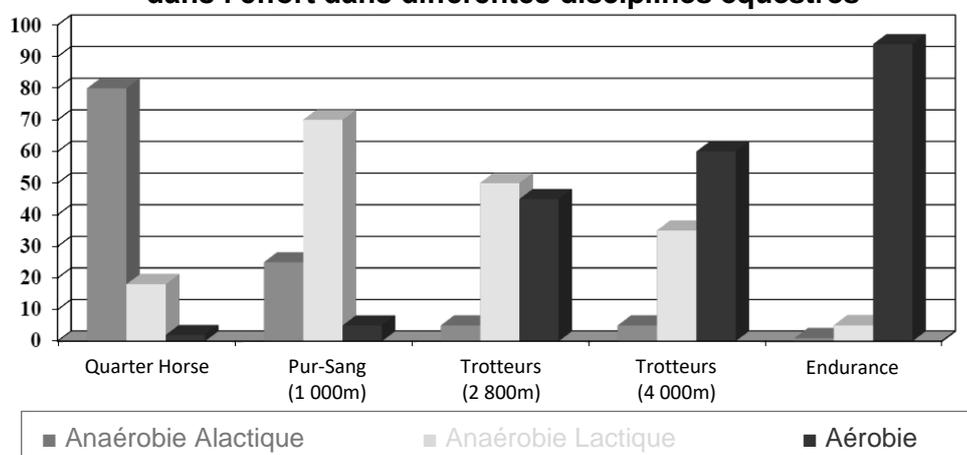
a. Production d'énergie

La production d'ATP doit être rapide et suffisante pour répondre aux besoins importants lors d'un effort. Selon l'effort, trois voies métaboliques sont successivement impliquées dans la production d'ATP pour répondre aux besoins énergétiques (Barnes, 2014 ; Couroucé A., 2022 ; Evans, 2007) :

- la voie **anaérobie alactique** fournit l'énergie immédiate nécessaire aux efforts brefs et intenses, comme les épreuves de CSO ou les courses de Quarter Horse. Ce sont principalement l'ATP et la phosphocréatine directement disponibles dans les muscles qui sont utilisés.
- la voie **anaérobie lactique** est utilisée pour les efforts un peu plus longs et intenses comme pour les courses de galop sur le plat entre 1 000 et 2 000 mètres. L'utilisation de cette voie diminue au fur et à mesure que la distance de course augmente. L'ATP est produite en dégradant le glucose issu du glycogène intramusculaire ou le glucose sanguin, sans consommation d'oxygène (O_2) mais avec production d'acide lactique.
- la voie **aérobie** est, elle, utilisée pour un effort un peu moins intense et sur de longues distances/durées. C'est la voie privilégiée des trotteurs, des chevaux de CCE et des chevaux d'endurance. L'ATP est produite par dégradation du glucose intramusculaire ou sanguin et des acides gras des réserves des cellules musculaires de l'organisme. Les réactions métaboliques se font en présence d' O_2 dans les mitochondries mais sans production d'acide lactique.

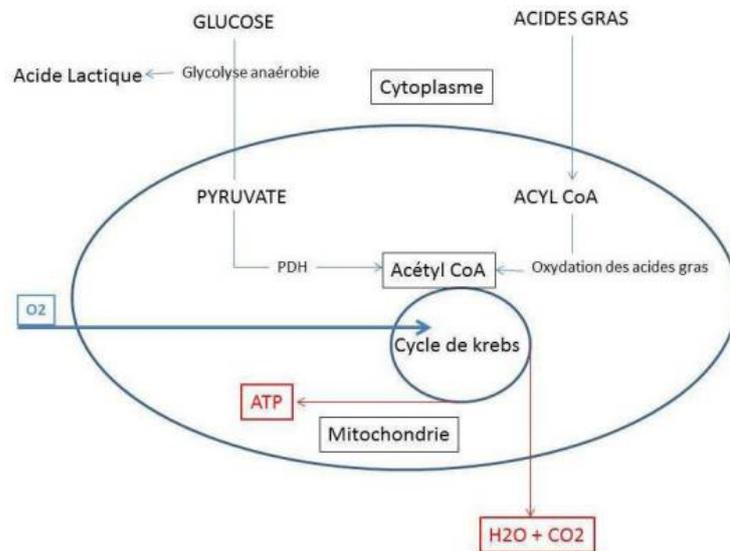
Lorsqu'un exercice physique est initié, ces trois voies métaboliques sont mobilisées puis se maintiennent dans des proportions différentes en adaptation à l'intensité et à la durée de l'effort, comme illustré dans la figure suivante (Couroucé A., 2022).

Figure 2 : Proportion des différentes voies métaboliques impliquées dans l'effort dans différentes disciplines équestres



Pendant une course d'endurance équestre, l'effort demandé est de longue durée mais d'intensité relativement faible (Bergero *et al.*, 2005). Pour y répondre, la voie aérobie est privilégiée. Elle produit de l'ATP, en présence d'O₂, par la respiration mitochondriale, via la dégradation du glycogène hépatique ou musculaire et des triglycérides des réserves musculaires ou adipeuses, avec production de déchets sous forme d'eau et de dioxyde de carbone (figure 3).

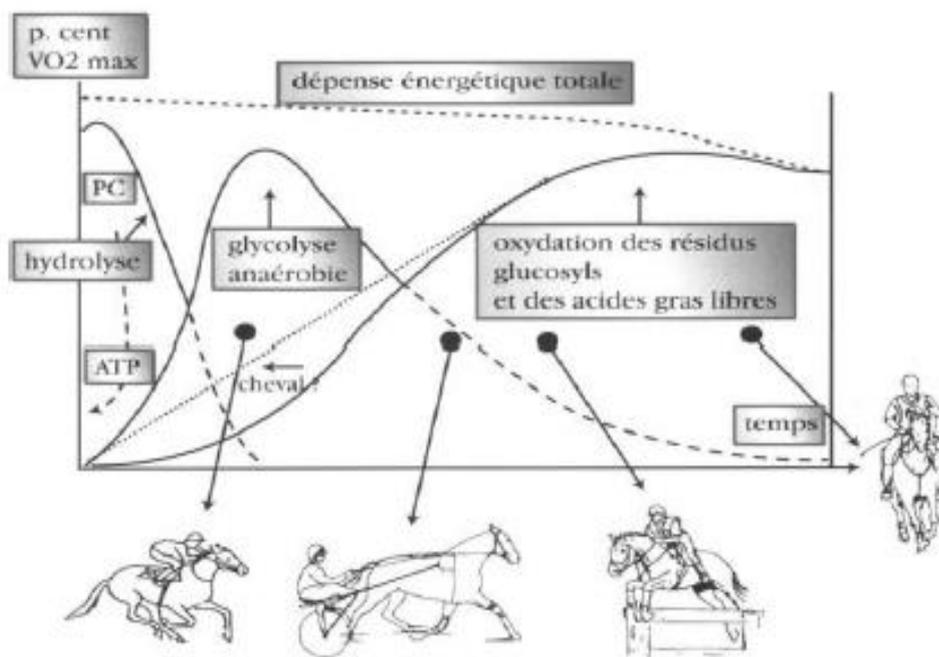
Figure 3 : Représentation schématique de la voie métabolique aérobie (Tribout, 2013)



b. Consommation des substrats (McMiken, 1983)

Deux types de sources d'énergie sont mobilisables par les cellules musculaires pour la production d'ATP. La figure 4 représente l'utilisation de ces substrats énergétiques selon l'intensité de l'effort demandé (Art *et al.*, 2000).

Figure 4 : Mise en jeu des trois filières du métabolisme énergétique et mobilisation des substrats énergétiques en fonction de l'intensité de l'effort pratiqué



- *Glucides*

Le glucose provient du glycogène mis en réserve dans les cellules musculaires et hépatiques, et du glucose sanguin circulant (Wolter, 1996).

Les réserves de glycogène hépatique sont faibles et ne permettent pas de couvrir les dépenses énergétiques d'une course de plus de 30 minutes car le foie ne déstocke jamais complètement son glycogène.

Les réserves de glycogène musculaires sont les plus importantes et représentent 2% du poids du muscle, qui représente lui-même plus de 50% du poids vif du cheval (Benamou-Smith, 2003). La concentration des muscles en glycogène est fonction du type des fibres musculaires et du régime alimentaire du cheval. L'oxydation du glycogène résulte en la production de 36 moles d'ATP par molécule de glucose.

Le glucose sanguin provient de l'absorption du glucose alimentaire mais résulte aussi de la néoglucogénèse du glycogène hépatique. La stabilité de la glycémie est primordiale pour l'intégrité des centres nerveux, et des contrôles hormonaux régulent la fabrication et la dégradation du glycogène, respectivement via l'insuline et le glucagon. Ainsi, sur de longues courses, une hypoglycémie peut être observée si les réserves glucidiques sont épuisées.

- *Lipides*

Les lipides constituent la source d'énergie la plus importante, notamment lors d'effort d'endurance, puisqu'elle est plus rentable que le glucose (136 molécules d'ATP produites par bêta oxydation d'acides gras) et que le tissu adipeux en constitue une réserve majeure. La figure 4 illustre notamment que la contribution des lipides est d'autant plus importante lors d'un exercice prolongé comme l'endurance.

Dans le muscle, les lipides sont oxydés sous trois formes : les acides gras libres, les triglycérides musculaires et les triglycérides plasmatiques. Les triglycérides musculaires sont les lipides majoritairement utilisés lors d'un exercice à vitesse moyenne relativement faible comme en endurance. Le tissu adipeux forme la principale réserve de lipides, mais sa mobilisation est progressive au cours de l'effort en raison d'un délai de déclenchement de la lipolyse. Enfin, les triglycérides plasmatiques, qui sont d'origine alimentaire ou hépatique, constituent la dernière source de lipides utilisables par l'organisme.

La mobilisation des lipides est donc une voie à favoriser dans l'effort d'endurance puisque cette source d'énergie est plutôt abondante et permet de préserver les stocks glucidiques qui sont, eux, plus limités. Cela est rendu possible par une alimentation hyperlipidique, mais aussi un entraînement adapté provoquant une modification de la transcription des gènes en faveur de la dégradation des acides gras dans les cellules musculaires (Li *et al.*, 2012 ; Luck *et al.*, 2015 ; Myčka *et al.*, 2023).

c. Elimination des déchets métaboliques

Pendant une course d'endurance, les besoins énergétiques peuvent augmenter brutalement lors d'un sprint ou au passage d'un dénivelé important. La voie anaérobie lactique est alors mise à profit, mais elle produit de l'acide lactique et des protons H⁺ comme déchets. Les systèmes tampons de l'organisme via l'oxydation des lactates en pyruvate permettent de neutraliser l'acidité, jusqu'à un seuil de saturation au-delà duquel l'acide lactique s'accumule. Ce seuil de tolérance varie selon les individus, et s'accroît avec l'entraînement (Couroucé *et al.*, 2002 ; Marlin *et al.*, 2002). La chute de pH entraîne une diminution des capacités enzymatiques et peut être responsable de crampes, de fatigue, de désordres métaboliques ou de mauvaise récupération. Ce sont ces signes de dépassement qui sont notamment recherchés lors des passages aux contrôles vétérinaires.

d. Consommation énergétique et travail mécanique

Le muscle consomme l'énergie chimique sous forme d'ATP pour la transformer en énergie mécanique et se contracter. Cette transformation a lieu au sein des fibres musculaires contractiles.

- *Typologie de fibres musculaires*

Le tissu musculaire est constitué de différents types de fibres : les fibres lentes de type I et les fibres rapides de type IIA et IIX chez le cheval. Elles présentent des propriétés contractiles et métaboliques distinctes (Rivero *et al.*, 2001).

Les **fibres de type I** ont une vitesse de contraction et de relâchement faible. Leur métabolisme est exclusivement aérobie et elles consomment préférentiellement des acides gras. Un réseau capillaire développé apporte ces substrats aux nombreuses mitochondries les composant. Ce sont des fibres adaptées aux efforts d'intensité modérée et de longue durée, comme l'endurance.

Les **fibres de type II** ont une vitesse de contraction et de relâchement intermédiaire pour les IIA et rapide pour les IIB :

- Les fibres de **type IIA** ont une contraction rapide et plus puissante que les fibres de type I, avec une plus grande résistance à la fatigue. Leur métabolisme est aérobie et consomme préférentiellement le glycogène via la glycolyse. Elles permettent un effort intermédiaire en vitesse et en puissance et sont donc adaptées à la performance générale du cheval d'endurance.
- Les fibres de **type IIB ou IIX** sont plus rapides que celles de type IIA mais leur capacité de glycolyse aérobie est plus faible. Elles utilisent principalement la voie anaérobie avec production d'acide lactique et sont donc peu résistantes à la fatigue. Ce sont des fibres adaptées aux efforts de puissance comme les accélérations et les sauts.

La proportion de ces différentes fibres au cœur du muscle peut varier en réponse à l'effort demandé, c'est-à-dire avec l'entraînement. Ainsi, on nomme IIC les formes de transition entre fibres IIA et IIB.

- *Distribution des fibres musculaires*

Les fibres musculaires se distribuent différemment selon l'individu, la race, l'âge, la discipline pratiquée, le niveau d'entraînement et les muscles concernés. Le pourcentage de fibres de type I et de fibres de type II est déterminé génétiquement à la naissance selon la race comme décrit dans le tableau 4, et l'entraînement peut impacter le pourcentage relatif de fibres IIA par rapport aux fibres IIB (Latham *et al.*, 2021).

Tableau 4 : Répartition moyenne des différents types de fibres dans des biopsies de muscle fessier moyen chez différentes races (Couroucé A., 2022 ; Tribout, 2013)

Race	Pourcentage de fibre sur biopsie			Rapport (I+IIA) / IIB
	Fibres I	Fibres IIA	Fibres IIB	
Cheval de chasse	25,1	37,1	37,8	1,65
Poney	22,5	40,4	37,1	1,70
Trotteur	24,0	49,0	27,0	2,70
Arabe	30,4	41,7	27,9	1,94
Pur-sang Anglais	12,5	50,7	36,8	1,72
Quarter Horse	8,7	51,0	40,3	1,48

Les chevaux pur-sang Arabe et Trotteur disposent d'une plus grande proportion de fibres oxydatives de type I et IIA que la majorité des autres races. Ces caractéristiques témoignent d'une adaptation des muscles aux épreuves de longue durée comme les courses de trot et l'endurance équestre. (Lopez-Rivero *et al.*, 1991 ; Oldham *et al.*, 1990 ; Valberg, 2014). A l'inverse, les Quarter Horse sont sollicités sur des efforts très violents et de très courte durée : ils présentent une accélération positive tout au long de leur course d'environ 400 mètres (Nielsen *et al.*, 2006). Ils disposent de peu de fibres de type I mais de nombreuses fibres IIB.

Le muscle squelettique dispose d'un fort potentiel d'adaptation à l'entraînement. Ainsi, un entraînement en endurance favorise la proportion de fibres IIA par rapport aux fibres IIB (Latham *et al.*, 2021 ; Lopez-Rivero *et al.*, 1991 ; Oldham *et al.*, 1990 ; Tyler *et al.*, 1998) par la transformation de fibres IIB en IIA et améliore ainsi les capacités du métabolisme aérobie du cheval athlète (Rivero *et al.*, 2001 ; Rivero et Hill, 2016). Les fibres IIB sont mobilisées lors d'épuisement des substrats métaboliques des fibres de type I et IIA (acides gras et glycogène) ou à la faveur d'une accélération.

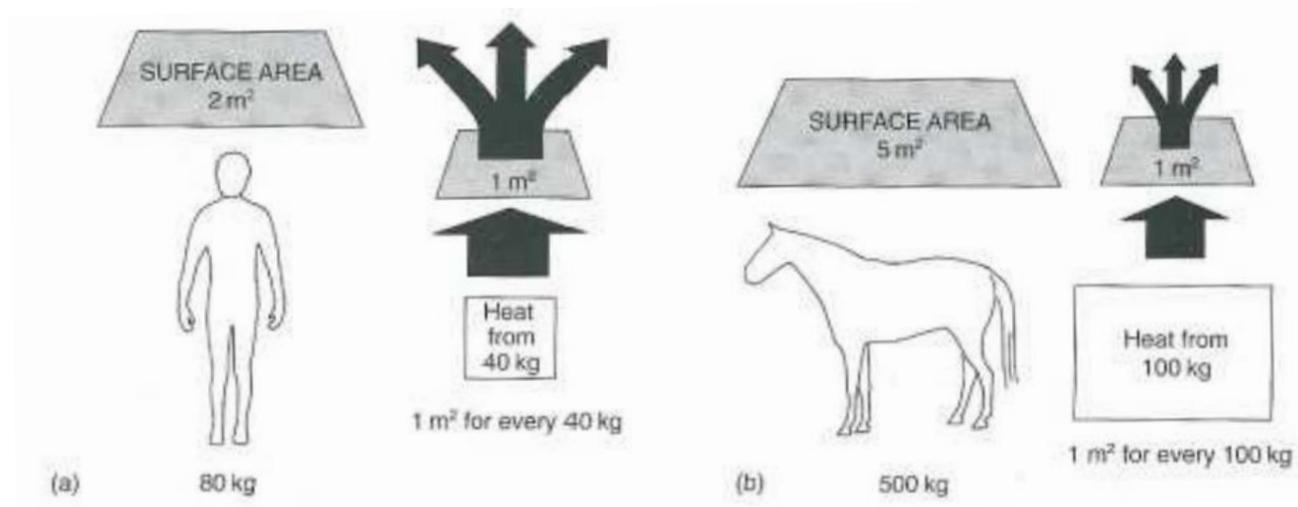
B. Thermorégulation

a. Production de chaleur lors de l'effort

La transformation de l'énergie chimique en énergie mécanique est de rendement minime puisque 75 à 80 % de l'énergie chimique est transformée en chaleur, qui augmente la température corporelle (Guthrie, 1998). Cette production de chaleur est fonction du type de substrat métabolisé, donc de la voie métabolique engagée pour répondre aux besoins énergétiques, c'est-à-dire du type d'effort imposé et de la durée de l'exercice. Ainsi, sur une course d'endurance de 160 km, si aucune chaleur n'est dissipée, l'augmentation de la température corporelle est estimée à 15°C par heure. (Hodgson, 2014)

Le cheval dispose d'une très grande capacité métabolique, 20 à 25 fois supérieure à l'exercice qu'au repos, mais il ne dispose que d'une très petite surface corporelle de dissipation de chaleur, comme représenté sur la figure 5 (Art *et al.*, 2000).

Figure 5 : Comparaison des surfaces corporelles relatives au poids chez l'Homme (a) et chez le cheval (b) (Art *et al.*, 2000)

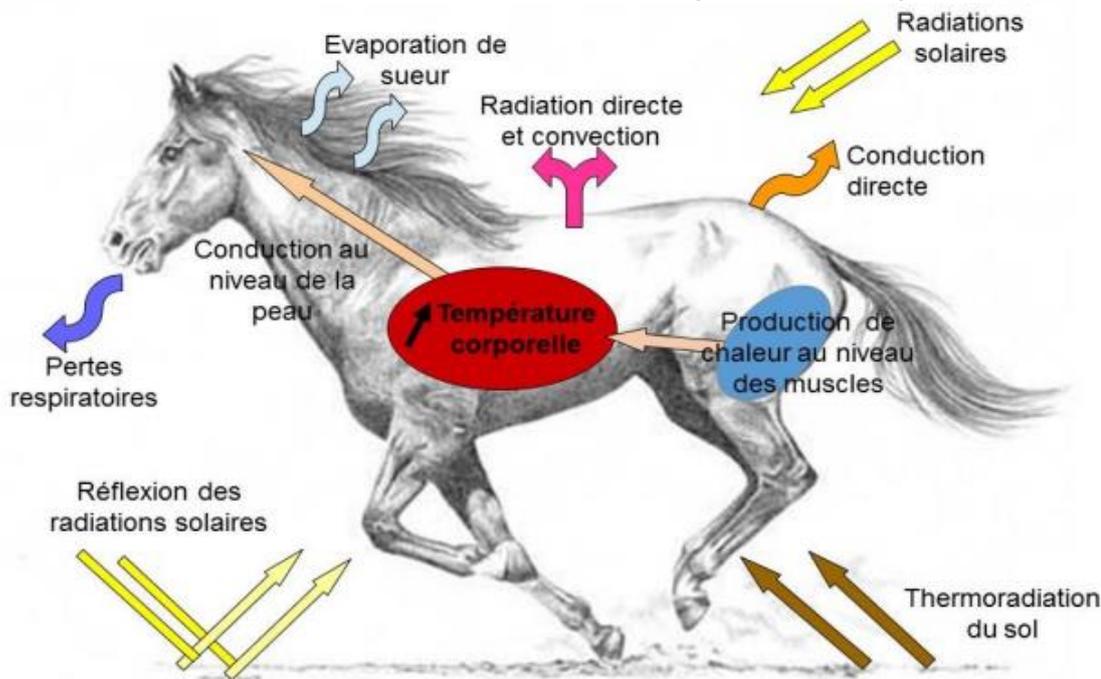


En comparaison avec l'Homme, le cheval a 2,5 fois plus de chaleur à dissiper par mètre carré de surface corporelle. Des mécanismes de thermorégulation doivent donc être activés pour limiter une augmentation trop sévère de la température corporelle, qui peut être fatale au cheval.

b. Modes de dissipation de la chaleur

La figure 6 illustre les échanges thermiques entre le cheval et son environnement (Lienhart, 2016).

Figure 6 : Mécanismes d'échanges thermiques entre un cheval et son environnement lors d'un effort (Lienhart, 2016)

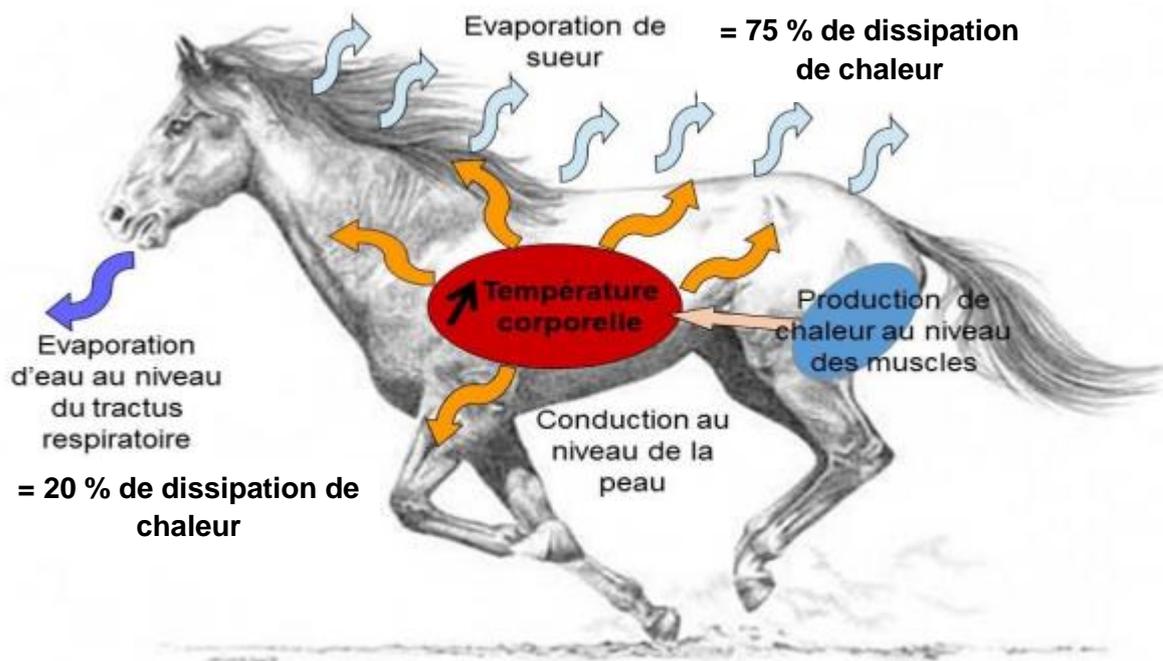


Les différents mécanismes sont les suivants (Hodgson, 2014) :

- **Conduction** : la chaleur est transmise du corps chaud vers l'air froid par contact direct mais, l'air étant un mauvais conducteur, ce mode intervient peu dans la dissipation générale de chaleur chez le cheval.
- **Radiation** : dans un environnement plus froid, le cheval perd de la chaleur par rayonnement électromagnétique, mais ce mécanisme est négligeable lors de l'effort.
- **Convection** : l'air au contact de la peau se réchauffe, perd en densité par rapport à l'air ambiant plus froid, et s'élève. L'air le remplaçant est alors plus frais. Ce mécanisme de renouvellement constant de l'air au contact de la peau permet une dissipation de la chaleur par convection. Ce phénomène est d'autant plus efficace en présence de vent, mais il est entravé par la présence de poils qui constituent une couche isolante emprisonnant l'air à la surface de la peau et réduisant sa circulation.
- **Evaporation** : il s'agit du mode de dissipation de chaleur le plus développé chez le cheval d'endurance. Cette perte de chaleur s'effectue par deux mécanismes physiologiques : la transpiration, et l'évaporation d'eau au niveau de l'appareil respiratoire.

Comme chez l'Homme, la transpiration est la principale voie de thermorégulation du cheval, puisqu'elle représente environ 75% de la dissipation de chaleur totale, auxquels s'ajoutent 20% par l'évaporation d'eau au niveau de l'appareil respiratoire, comme illustré sur la figure 7 (Lienhart, 2016). Sur une course d'endurance, l'effort est tel que le cheval peut perdre 10 à 15 litres par heure de course (Flaminio et Rush, 1998). Cette quantité considérable est liée au potentiel de redistribution de 20 à 25% du flux sanguin vers la peau, mais aussi à la grande quantité de glandes sudoripares apocrines, localisées essentiellement au niveau de l'encolure, des flancs et du pli de l'aîne. Ces deux systèmes physiologiques sont sous contrôle adrénérgique.

Figure 7 : Schéma simplifié des mécanismes de thermorégulation mis en jeu lors d'un effort d'endurance en milieu tempéré (Lienhart, 2016)



Une bonne réhydratation aux points d'assistance et aux vet-gates est donc primordiale pour la santé du cheval, en particulier par temps chaud et humide, où le mécanisme d'évaporation est limité (Lisboa *et al.*, 2023). Diverses méthodes de mesure moins invasives de température corporelle sont en développement, comme une micropuce avec capteur thermique ou une sonde gastro-intestinale sous forme de pilule, afin d'évaluer au mieux la température corporelle des chevaux (Kang *et al.*, 2023 ; Verdegaal *et al.*, 2021). Cette démarche vise à préserver la santé des chevaux sur les terrains de compétition (Kakamu *et al.*, 2017), en particulier dans un contexte de réchauffement climatique auquel l'homme, mais aussi les autres espèces animales comme les chevaux, sont confrontés (Raymond *et al.*, 2020).

Contrairement à la sueur hypotonique de l'homme, celle du cheval est hypertonique. Elle est majoritairement composée d'ions sodium Na^+ , chlorure Cl^- et potassium K^+ . Leur perte par sudation peut donc mener, au-delà d'une simple déshydratation, à des désordres électrolytiques et acido-basiques parfois responsables d'arythmies cardiaques, de diminution du transit intestinal, de crampes musculaires, voire de myosite (Foreman, 1998). Les besoins en thermolyse sont ainsi l'un des principaux facteurs limitants lors d'une course d'endurance.

C. Indices d'évaluation des performances (Ricard *et al.*, 2021 ; Sabbagh *et al.*, 2017)

Les prestations sportives des chevaux sont évaluées par le niveau de compétition atteint et leurs résultats en compétition, mais il existe aussi des méthodes pour les comparer à l'ensemble des chevaux compétiteurs dans une discipline.

L'évaluation des chevaux dans les disciplines olympiques, que sont le CSO, le Dressage et le CCE, se fait principalement sur deux types d'indices : les indices de performance et les indices génétiques. Ils sont utiles pour comparer le niveau des chevaux les uns par rapport aux autres, pour évaluer la qualité d'un individu lors d'une vente ou d'un achat, et pour la sélection des reproducteurs.

Les indices de performance dans les disciplines olympiques datent de 1972, et ont été suivis par les indices génétiques en 1989 pour le CSO, et en 1997 pour le dressage et le CCE ; mais leur introduction en endurance est bien plus tardive. En 2003, les éleveurs de chevaux d'endurance, représentés par l'Association française du Cheval Arabe, ont montré un vif intérêt pour la création d'indices similaires dans leur discipline. Les Haras Nationaux ont alors collaboré avec l'INRAE pour leur élaboration.

a. Indice global de carrière : IRE

Depuis 2006, un indice de performance en raid d'endurance (IRE) est calculé annuellement pour tous les chevaux ayant atteint un niveau de compétition d'au moins 80 km en endurance. Initialement, il ne prenait en compte que les résultats enregistrés par la FFE des compétitions d'endurance en France, qui sont transmis via le SIRE à l'INRAE. Actuellement, certaines données de la FEI sont aussi prises en compte. Les résultats des courses FEI se déroulant dans les pays d'Europe du Nord, du Sud, et en Russie, sont aussi transmis pour les chevaux identifiés en France.

La méthode de calcul de cet indice suit des évolutions régulières dans une optique de caractérisation plus objective et complète des performances en endurance. Ainsi, l'INRAE se base sur trois critères :

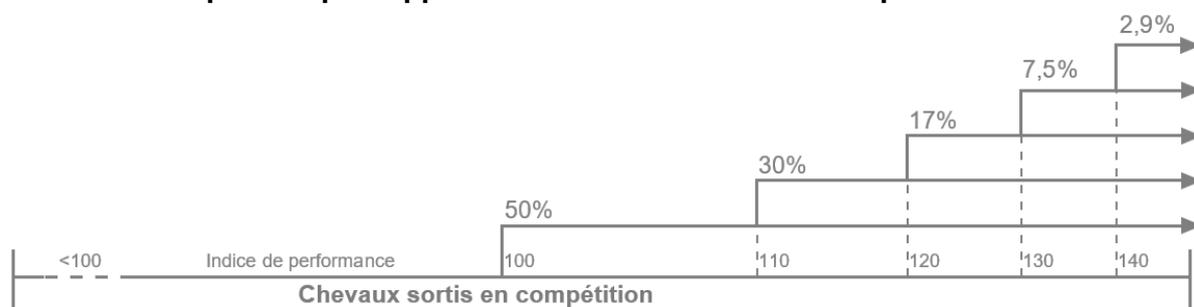
- La **vitesse**, qui n'est prise en compte que pour les épreuves à vitesse libre. Comme la vitesse varie avec la difficulté de la course, ce n'est pas la valeur absolue de vitesse qui est utilisée mais la vitesse relative d'un cheval par rapport à la vitesse moyenne des autres chevaux classés, et ce pour chaque compétition. La vitesse est donc corrigée par le niveau moyen des autres chevaux classés, et la concurrence est prise en compte ;
- Le **classement**, qui s'évalue binairesment selon que le cheval est classé ou non, sans distinction selon le motif d'abandon ou d'élimination. Des corrections sont effectuées avec le taux de classés, qui révèle la difficulté de la course et permet la prise en compte de la concurrence ;
- La **distance**, qui utilise la distance réelle de chaque épreuve lorsqu'elle est disponible, ou attribue des équivalences pour plus de précision. Par exemple, une course de 80 km parcourue sur deux jours consécutifs équivaut à une course de 120 km. Les championnats internationaux sont aussi valorisés dans le calcul avec des distances forfaitaires allant de 160 à 200 km.

L'indice combiné est une pondération des trois indices précédemment cités, à hauteur de : 35% pour la vitesse, 30% pour le classement et 35% pour la distance. Des corrections sont ensuite effectuées pour prendre en compte les effets de l'âge et du sexe. Par exemple, les jeunes chevaux courent à des vitesses moindres que les chevaux âgés, mais sont plus souvent classés.

Chaque indice, élémentaire ou global, est accompagné d'un coefficient de détermination (CD) qui transcrit la précision de l'indice calculé. Il dépend de la quantité et la qualité des informations disponibles pour chaque cheval, et varie de 0 à 1. Plus le CD est proche de 1, plus l'indice est précis.

Enfin, l'indice global de carrière, ou IRE, est tel que la médiane des chevaux sortis en compétition d'endurance est centrée sur 100. L'ensemble des chevaux indicés sont ainsi répartis tels qu'approximativement 50% des chevaux sortis en compétition et ayant un CD supérieur à 0,5 ont un indice supérieur à 100, 30 % en ont un supérieur à 110, 17 % supérieur à 120, 7,5 % supérieur à 130, et 2,9 % supérieur à 140 ; comme illustré par la figure 8.

Figure 8 : Schéma de la répartition théorique des pourcentages de chevaux sortis en compétition par rapport à la valeur de leur indice de performance



Dans chaque discipline, l'indice de performance est actualisé chaque année en tenant compte de l'ensemble des résultats dans la discipline des années précédentes. L'IRE reflète ainsi la carrière complète en endurance de chaque cheval.

b. Indice génétique : BRE

Il a été évalué qu'environ 15 à 25 % de la performance en concours hippique est d'origine héréditaire, 25% en course de trot, 35 % en course de galop, d'après les travaux respectifs de Tavernier (1986, 1992) et Langlois (1980, 1982) cités par Barrey (1992). Chez le Quarter Horse, 20 % de la performance matérialisée par le total des gains sur la carrière seraient héréditaires (Silva *et al.*, 2014).

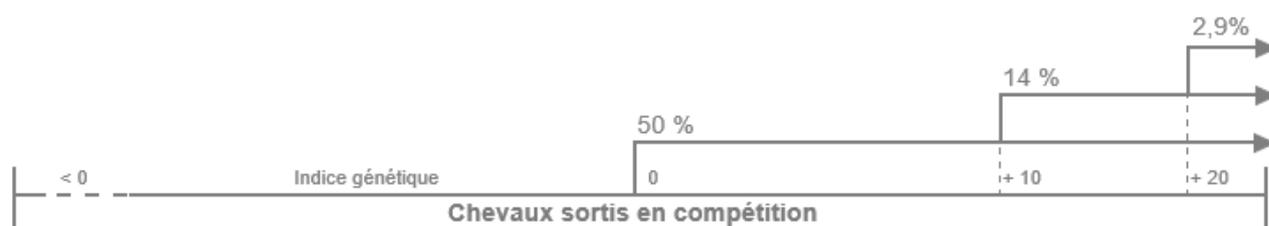
Dans les disciplines olympiques, les indices génétiques ou BLUP (Best Linear Unbiased Prediction), introduit par Charles Henderson en 1973 permettent d'apprécier la valeur génétique d'un cheval dans une discipline. Ils ont un intérêt dans la sélection et le choix d'accouplements raisonnés dans une optique d'amélioration génétique de la race. La méthode BLUP est d'abord appliquée à l'espèce équine en France dès 1985, puis progressivement étendue à d'autres espèces, principalement d'élevage, comme les bovins, les ovins, les caprins, les suidés et même les volailles (Colleau et Jacques, 1996).

L'INRAE calcule ces indices en prenant en compte les performances du cheval dans une discipline donnée ainsi que celles de ses apparentés, à savoir les parents, collatéraux et descendants. Le BLUP affecté à la naissance d'un poulain est égal à la moyenne arithmétique des BLUP de ses géniteurs puis, chaque année, il évolue en fonction de ses performances et de celles de ses apparentés. La valeur du BLUP est centrée sur zéro, qui représente la moyenne de la population active en compétition, et s'exprime donc en points positifs et négatifs. Un cheval améliorateur a un BLUP positif.

Depuis 2016, l'indice génétique BRE (BLUP en Raid d'Endurance) est calculé pour la discipline d'endurance. Comme pour l'IRE, le BRE du cheval d'endurance est accompagné d'un coefficient de détermination (CD), entre 0 et 1, qui transcrit la précision de l'indice. Plus les données sont nombreuses, plus l'indice est précis avec un CD proche de 1. Les indices des chevaux dont le CD est très faible ne sont généralement pas publiés par le SIRE, par exemple pour éviter de les desservir lorsque leur expérience en endurance est limitée.

Ainsi, les BRE sont exprimés tels que, parmi la population de référence des chevaux nés entre 2003 et 2011 compris et ayant couru au moins une fois, environ 50 % des chevaux ont un BRE positif, 14 % ont un BRE supérieur à +10 et les 3 % meilleurs ont un BRE supérieur à +20 (Crichan, 2019) ; comme illustré par la figure 9.

Figure 9 : Schéma de la répartition théorique des pourcentages de chevaux sortis en compétition par rapport à la valeur de leur indice génétique



La mise en place d'indices spécifiques pour l'évaluation des performances dans les disciplines équestres est relativement récente, alors que l'intérêt porté à la recherche de caractéristiques associées à la réussite dans ces sports est bien antérieur. Dans les années 1970, par exemple, la performance en course de vitesse est définie par le logarithme des gains annuels (Langlois *et al.*, 1975). Mais dans de nombreuses études portées sur le profil type d'un cheval et les facteurs favorables au succès, tous sports équestres confondus, la performance est tantôt estimée par des paramètres de carrière tels que le nombre de qualifications en compétition, la somme des gains, la durée de carrière, le niveau maximal d'épreuve atteint, tantôt par un classement ou un résultat chronométrique ponctuel (Doyle *et al.*, 2022 ; Ricard *et al.*, 2020b ; Ricard et Touvais, 2007 ; Thiruvankadan *et al.*, 2009). L'endurance ne fait pas exception, et si les études concernant les facteurs favorables à la discipline d'endurance sont nombreuses, rares sont celles qui utilisent les indices IRE de l'INRAE comme indicateurs de performance.

3. Critères d'évaluation et qualités recherchées pour la performance du cheval d'endurance

De nombreuses études se sont intéressées au profil type du cheval d'endurance et aux facteurs qui pourraient être associées à la performance en compétition. L'intérêt réside notamment dans le fait de pouvoir améliorer l'entraînement mais surtout d'anticiper l'aptitude dans la discipline, avec une sélection raisonnée des individus. Les reproducteurs doivent présenter des caractéristiques favorables à la performance d'une part, et susceptibles d'être transmises et exprimées par la descendance d'autre part.

A. Caractéristiques intrinsèques : race, âge, sexe et mental

a. Race

Il existe des différences majeures de morphologie et d'allure entre les différentes races, que l'Homme valorise selon ses goûts et l'utilité pour laquelle le cheval est destiné.

En endurance, les races représentées sont diverses et présentent chacune des qualités et des défauts propres face à la longueur de la course, au terrain et aux conditions climatiques (Ancelet, 2014). Cependant, les chevaux de race Arabe ou croisés Arabe sont les plus présents en compétition (Ricard et Touvais, 2007). Pour l'illustrer, on peut s'intéresser aux chevaux les mieux indicés en endurance à l'issue de l'année 2018 grâce aux informations de l'IFCE. On constate que les effectifs de la race Arabe (58 %) et des croisement demi-sang Arabe (19 %) comptent pour plus de trois-quarts des 8 028 chevaux disposant d'un IRE supérieur à 100 (IFCE, 2023)

b. Âge

Les chevaux d'endurance commencent l'entraînement vers 4 ou 5 ans et ne peuvent atteindre le haut niveau (3*– 160 km sur une journée) qu'à partir de 8 ans. L'entraînement induit progressivement des adaptations physiques et physiologiques à l'effort d'endurance, d'où l'intérêt de l'initier chez le jeune cheval pour espérer atteindre le haut niveau.

L'âge influence deux aspects de la performance en endurance : un cheval de moins de 12 ans se classe plus fréquemment qu'un cheval plus âgé, mais plus le cheval vieillit, plus il prend de l'expérience et va vite. Ainsi, en combinant ces deux critères de vitesse et de classement, on obtient un optimum de carrière entre 9 et 11 ans selon Ricard et Touvais (2007). Ces résultats concordent avec ceux d'une étude réalisée sur 74 629 départs de 21 346 chevaux distincts en épreuves internationales de 2012 à 2019, mettant en évidence qu'à chaque année supplémentaire à partir de l'âge de 9 ans, la probabilité qu'un cheval se qualifie diminue (Zuffa *et al.*, 2022).

Par ailleurs, à l'échelle d'un pays, en combinant les niveaux d'endurance nationaux et internationaux, une étude réalisée en Nouvelle-Zélande met en évidence une relation significative entre un âge supérieur à 10 ans et un risque d'élimination pour motif métabolique (Legg *et al.*, 2019). Le vieillissement compromettrait la capacité du cheval à combiner la réponse à l'effort demandé et la thermorégulation requise, en partie à cause d'une diminution du volume plasmatique (McKeever *et al.*, 2010).

c. Sexe

Les hommes réalisent généralement de meilleures performances sportives que les femmes. Les deux sexes présentent des différences de morphologie, de physiologie et d'équilibre hormonal, qui impliquent par exemple que, pour une taille donnée, la femme présente un pourcentage de graisse plus élevé, un volume sanguin et un taux d'hémoglobine plus faible et, par conséquent, une moindre capacité de transport de l'oxygène. Les femmes seraient ainsi moins performantes en endurance mais, parmi les ultra-marathoniens, elles présenteraient une meilleure résistance à la fatigue musculaire que les hommes (Senefeld *et al.*, 2021 ; Van Damme *et al.*, 2008). Pourtant, chez les lévriers et les chevaux de course, l'impact du dimorphisme sexuel sur la performance ne semble pas aussi marqué (Senefeld *et al.*, 2021).

Bien que des études réalisées sur des Pur-sang anglais de course illustrent un avantage des mâles entiers, via leur plus grande vitesse, sur les hongres et les femelles (Langlois *et al.*, 1975), les observations sont contraires en endurance. Sur une population de 21 346 chevaux de toutes races, engagés sur des épreuves FEI d'endurance de 80 à 160 km, le taux de classement des juments et des étalons est moindre par rapport à celui des hongres (Zuffa *et al.*, 2022). Plus spécifiquement, au sein de 2 795 chevaux adultes de race Arabe et croisés Arabe en compétition internationales d'endurance, la différence de performance s'exprime au désavantage des mâles entiers sur les critères de classement et de vitesse, par rapport aux hongres et femelles (Ricard et Touvais, 2007). Ces dernières présentent un taux de classement légèrement plus faible que celui des hongres, mais leur vitesse n'est pas significativement différente, contrairement aux autres disciplines équestres.

Une hypothèse est que les femelles peuvent être en chaleur au moment de la course et avoir des performances altérées, notamment en raison de fatigue ou de colique (douleur d'origine abdominale). Pourtant, aucune différence significative de comportement sous la selle n'est mise en évidence entre les hongres et les femelles dans l'étude de (Aune *et al.*, 2020), et il est intéressant de noter qu'historiquement, les arabes-nomades appréciaient davantage les juments, qu'ils considéraient plus calmes, plus faciles à manier, et plus endurantes (Ancelet, 2014).

d. Mental

Les traits de caractère d'un cheval ont une part d'origine génétique, mais sont aussi modifiés par l'environnement et l'expérience (Rankins et Wickens, 2020). Ils évoluent avec l'âge (Vidament *et al.*, 2021) et la valorisation de certains comportements pour l'usage dans une discipline en compétition est aussi soumise à l'avis subjectif du cavalier. Par exemple, les cavaliers de CSO confirmés semblent apprécier monter des chevaux plutôt émotifs, bien qu'aucune étude n'établisse de lien clair avec de meilleures performances (Lansade, 2021).

McBride et Mills (2012) tentent, de définir les facteurs psychologiques liés à la performance dans diverses disciplines équestres, afin de développer des stratégies d'entraînement et de renforcement positif pour limiter le stress. Un cheval peu sensible au stress, qui préserve une bonne prise alimentaire et de boisson dans des circonstances de compétitions variées, a aussi tendance à avoir une meilleure récupération après l'effort. L'attitude avant une course de 160 km a aussi été corrélée au classement final sur 22 évaluations qualitatives de comportement de 10 chevaux. Les chevaux considérés « alertes / excités / curieux » étaient mieux classés à l'issue de la course que les chevaux qualifiés comme « fatigués / paresseux » au départ (Fleming *et al.*, 2013).

Le cheval d'endurance est donc préféré volontaire et généreux. Il ne doit pas avoir trop de sang et ne pas être trop émotif.

B. Caractéristiques physiologiques et améliorations par l'entraînement

Les qualités physiologiques ont été évoquées précédemment et découlent de la nécessité d'aérobiose.

a. Capacité aérobie

La capacité aérobie d'un cheval peut être améliorée par l'entraînement mais cette capacité d'adaptation est déterminée génétiquement (Barrey, 1992). Comme chez l'Homme, elle est représentée par le volume d'absorption maximal d'oxygène (VO₂max), et exprimée comme un débit relatif au poids du cheval, c'est-à-dire en mL/min/kg. Chez le cheval, la VO₂max est deux fois plus élevée que chez l'Homme et peut atteindre 175 ml/min/kg chez le pur-sang de course. Plus elle est élevée, plus le cheval est capable d'effectuer des efforts intenses et prolongés. (Couroucé *et al.*, 2002)

La grande capacité aérobie du cheval est fonction de la qualité de son système respiratoire, de son débit cardiaque et de sa concentration en hémoglobine, qui traduisent le pouvoir d'oxygénation du sang, le transport, et l'extraction efficace de l'oxygène dans les cellules musculaires (Barrey, 1992 ; Evans, 2007). Une étude réalisée sur 38 chevaux d'endurance montre que les chevaux avec de mauvaises performances sont affectés par des maladies subcliniques, souvent concomitantes, touchant par ordre de fréquence décroissante l'appareil respiratoire, l'appareil musculo-squelettique et l'appareil cardio-vasculaire (Fraipont *et al.*, 2011).

- *Ventilation*

Les tests à l'effort, effectués de plus en plus couramment, illustrent que la ventilation du cheval est un compromis entre ses limites physiologiques et anatomiques et ses besoins métaboliques considérables. A l'effort, la ventilation augmente de moitié alors que la consommation d'O₂ est presque 30 fois supérieure à celle au repos (Couroucé *et al.*, 2002). L'intégrité des voies respiratoires supérieures est donc primordiale pour assurer un passage d'air suffisant par voie strictement nasale.

La capacité respiratoire réside aussi dans l'augmentation de la fréquence respiratoire qui assure les échanges gazeux nécessaires et participe à la thermorégulation. Une affection de l'appareil respiratoire, même minime, peut avoir des conséquences majeures sur les performances.

- *Débit cardiaque*

Si le cheval de sang est réputé pour avoir un cœur d'athlète, proportionnellement plus gros et plus efficace, qu'un cheval lourd (Robin, 2004), il est suggéré que l'entraînement à long terme modifie la fonction cardiaque, aussi bien dans sa fréquence (Cottin *et al.*, 2006 ; Kinnunen *et al.*, 2006) que dans ses dimensions (Buhl et Ersbøll, 2012 ; Trachsel *et al.*, 2016), notamment au niveau du ventricule gauche.

Le cheval dispose d'un potentiel de variation de son débit cardiaque considérable. La fréquence cardiaque lors d'un effort intense peut atteindre les 240 battements par minute, et il n'existe pas de limite de fréquence cardiaque maximale avec l'âge, à la différence de chez l'Homme. La marge de progression entre la fréquence cardiaque au repos et celle maximisée à l'effort est très élevée chez le cheval (Couroucé A., 2022 ; Couroucé *et al.*, 2002). L'indicateur de fréquence cardiaque maximale est beaucoup utilisé dans le suivi de l'entraînement du pur-sang de course ; en endurance, on s'intéresse davantage à la récupération cardiaque.

Un cheval d'endurance doit avoir un muscle cardiaque intègre et puissant, avec une très bonne récupération cardiaque, car la fréquence cardiaque après l'effort, à l'arrivée d'une boucle, doit revenir rapidement dans les normes de repos (Ancelet, 2014 ; Barnes, 2014 ; Fraipont *et al.*, 2011 ; Robin, 2004).

Ainsi, le temps de récupération cardiaque à l'entrée du vet-gate, c'est-à-dire le délai nécessaire à ce que la fréquence cardiaque diminue sous les 64 battements par minute à l'arrivée d'une boucle, montre un intérêt majeur dans l'anticipation du risque d'élimination à la boucle suivante. Il a été évalué, parmi 7 032 départs sur des courses de 80 à 160 km, qu'un cheval a 70 % de risque d'être éliminé au contrôle vétérinaire suivant si son temps de récupération cardiaque dépasse les 11 minutes aux premier ou deuxième vet-gate, ou 13 minutes aux troisième et quatrième vet-gate (Younes *et al.*, 2015).

- *Hématologie*

Les valeurs d'hématocrite et d'hémoglobininémie sont significativement associées à la vitesse dans l'étude de 16 chevaux sur des épreuves FEI de 65 à 120 km (Larsson *et al.*, 2013). Cela s'explique en partie par le fait que plus un cheval court vite sur une course d'endurance, plus il se déshydrate. Cependant le cheval bénéficie d'un pouvoir de relargage de globules rouges via la contraction splénique lors d'un effort, lui permettant de doubler son hématocrite (Couroucé A., 2022). Ce potentiel d'augmentation de l'hématocrite est primordial puisque l'effort d'endurance provoque une hémolyse, d'autant plus intense que la distance et la vitesse de course et la vitesse sont élevées (Pakula *et al.*, 2023). Cette hémolyse est aussi d'autant plus marquée chez les chevaux éliminés pour motif métabolique, témoignant donc qu'un cheval d'endurance doit présenter une bonne réponse hématologique à l'effort.

- *Volémie et état d'hydratation*

Le cheval d'endurance doit aussi être capable d'augmenter son volume plasmatique pour maintenir l'efficacité d'oxygénation et de transport de l'oxygène dans le sang, dans le contexte de déshydratation produit par la production de sueur pour la thermolyse. L'adaptation de la volémie s'améliore avec l'entraînement (Barnes, 2014 ; McKeever *et al.*, 2010) et est d'autant plus importante dans la performance des chevaux plus âgés, chez qui la volémie diminue (McKeever *et al.*, 2010).

Les chevaux déshydratés avant une course, avec un hématoците et un taux de protéines totales supérieurs sont plus sensibles aux troubles métaboliques, tout comme un déséquilibre hydro-électrolytique au départ est un facteur prédisposant à l'élimination pour motif métabolique (Barnes *et al.*, 2010 ; Trigo *et al.*, 2010). Pendant la course, la thermolyse produit une déshydratation hypertonique qui limite les capacités aérobies (Barnes, 2014 ; Flaminio et Rush, 1998). Le cheval d'endurance peut boire plusieurs dizaines de litres d'eau entre chaque boucles (Larsson *et al.*, 2013) et la correction de l'hyperthermie après l'effort est plus efficace chez les chevaux d'endurance que chez les trotteurs pour une montée en température induite par l'effort comparable dans la récente étude de Verdegaal *et al.* (2021).

Un cheval d'endurance doit donc avoir un état d'hydratation correct avant la course, un système de thermorégulation efficace, et il doit se réhydrater abondamment pendant la course.

- *Métabolisme musculaire aérobie*

Comme décrit précédemment, la capacité aérobie au niveau musculaire est aussi dépendante de la typologie des fibres composant les muscles. Un cheval d'endurance doit présenter, en parallèle d'un système musculo-squelettique intègre, un taux de fibres I et IIA maximal pour exprimer au maximum son potentiel aérobie dans les efforts d'endurance et de résistance (Lopez-Rivero *et al.*, 1991 ; Rivero et Hill, 2016 ; Tyler *et al.*, 1998).

En termes de réserves énergétiques, les stocks de glycogène et de triglycérides doivent être suffisants pour ne pas être des facteurs limitants à la capacité aérobie (Oldham *et al.*, 1990). Cela est en lien avec la quantité de tissu adipeux et l'état corporel du cheval (Institut de l'élevage, 1997), comme développé plus loin. De plus, l'entraînement en endurance est favorable à l'amélioration du métabolisme lipidique via modification, à l'échelle du génome, de la transcription des gènes impliqués dans ce métabolisme énergétique (Myćka *et al.*, 2023).

b. Tolérance à l'exercice et pouvoir de récupération

- ***Adaptation à l'effort***

L'effort d'endurance se traduit à l'échelle de l'organisme par des modifications hémato-biochimiques. Il provoque un état de stress avec une réaction inflammatoire du corps, notamment par le biais de cytokines. L'entraînement progressif et à long terme des chevaux d'endurance a montré une diminution de l'intensité de cette réaction inflammatoire avec une moindre quantité de molécules pro-inflammatoires, dès les 2 à 3 premiers mois d'entraînement (Witkowska-Piłaszewicz *et al.*, 2019). Le microbiote semble jouer un rôle central dans ce mécanisme, via la communication avec les mitochondries des cellules de l'intestin et la diminution de la transcription des gènes impliqués dans la réaction inflammatoire qu'il implique (Mach *et al.*, 2021).

La Sérums Amyloïde A (SAA) est un marqueur précoce d'inflammation chez le cheval, et a largement été étudiée chez le cheval de sport. Concernant l'endurance, il apparaît que les jeunes chevaux moins expérimentés présentent des taux de SAA plus élevés que les chevaux de plus haut niveau ; et bien que les valeurs soient dans les normes physiologiques, les taux de SAA avant la course des chevaux éliminés sont significativement augmentées par rapport aux chevaux qualifiés (Cywinska *et al.*, 2013, 2010). Cela témoigne d'une adaptation du cheval à l'inflammation régulière induite par l'endurance, avec une moindre réactivité et donc une SAA plus basse, qui semble favorable à de bons résultats en course.

Des résultats similaires sont obtenus avec les marqueurs de fragilité ou de souffrance musculaire et rénale, à savoir la créatine phosphokinase et la créatinine respectivement. En parallèle, la course sur une plus longue distance est corrélée à une augmentation de la majorité des paramètres hépatiques (à l'exception du cholestérol) dans l'étude de Cywinska (2013), qui met aussi en évidence un retour aux valeurs basales des paramètres hématologiques et biochimiques plus rapide chez les chevaux parcourant des distances plus longues, assimilables à des chevaux mieux entraînés et plus performants.

- ***Gestion des entraînements pour la performance***

Lors de l'entraînement des chevaux destinés aux épreuves de course de trot, de galop ou de CCE, le suivi de la lactatémie sanguine est une méthode largement décrite et appliquée pour le suivi et l'adaptation de l'intensité de l'entraînement, afin d'améliorer l'endurance des chevaux. Ces méthodes se basent sur la détermination de la vitesse de minimum de lactate ou du niveau d'équilibre maximal du lactate, et peuvent être réalisées sur le terrain avec des lecteurs rapides de lactate sur une goutte de sang. Elles permettent d'adapter la vitesse d'entraînement des chevaux, par sessions de l'ordre de quelques minutes, pour augmenter leur seuil de tolérance au lactate (Couroucé A., 2022 ; Santos *et al.*, 2022).

Bien que l'application de ces méthodes ait été étudiée sur des échantillons de chevaux Arabes (Miranda *et al.*, 2014), elles restent très peu pratiquées dans la discipline d'endurance où la durée des entraînements se compte souvent en heures, et plutôt en plein nature que sur piste d'entraînement. Le jugement de l'évolution d'un cheval en endurance, en résistance, et en qualité de récupération est plutôt subjectif. L'entraînement doit être individualisé, progressif et inclure des phases de récupération primordiales (Robert, 2019).

Ainsi, l'entraînement et la performance d'un cheval d'endurance se traduit en partie par l'intensité des réactions de l'organisme, qui peuvent être amplifiées (comme l'augmentation de l'hématocrite, du seuil de tolérance au lactate) ou réduites (comme les marqueurs inflammatoires) ; mais aussi par la capacité de l'organisme à retrouver rapidement des valeurs dans les normes après l'effort. C'est la capacité de récupération.

- *Temps de récupération*

Un cheval d'endurance doit avoir une bonne capacité de récupération, à différentes échelles de temps. A très court terme, le cheval doit avoir une redescende rapide de sa fréquence cardiaque, comme décrit précédemment par le travail de Younes (2015), et de sa température. A moyen terme après la course, il doit rétablir ses paramètres biochimiques et hydro-électrolytiques. Enfin, à plus long terme, il doit être capable de performer lors de la course suivante.

Le cheval a besoin d'un temps de repos qui dépend directement de sa capacité de récupération. La réglementation FEI impose par exemple des temps forfaitaires avant une nouvelle présentation en compétition internationale en cas d'élimination à une course (FEDERATION EQUESTRE INTERNATIONALE, 2019).

Plusieurs études ont mis en évidence un lien entre un nombre de jours de repos supplémentaires par rapport au nombre obligatoire règlementé par la FEI, et un moindre risque d'élimination (Bennet et Parkin, 2020 ; Nagy *et al.*, 2014b). Un optimum de 120 jours entre deux compétitions de niveau international a été établi dans l'étude des facteurs prédictifs liés à la qualification en compétition internationale de Zuffa *et al.* (2022).

C. Caractéristiques physiques

Que l'on s'intéresse aux chevaux d'une même discipline ou, dans une moindre mesure, aux chevaux d'une même race, la diversité des morphologies équines est frappante. Cependant, la morphologie est liée à la physiologie et à la locomotion, et constitue un pilier dans l'aptitude d'un cheval à répondre aux efforts imposés par toute discipline équestre.

a. Morphologie du cheval d'endurance

- *Etat corporel adéquat*

Les conclusions des études divergent lorsqu'il est question de déterminer la note d'état corporelle (NEC) ou le poids idéal d'un cheval d'endurance. Réalisée sur 61 chevaux de course d'endurance de 150 miles, l'étude de Lawrence et al. (1992) relève que les chevaux les plus performants présentent un plus faible pourcentage de tissu adipeux et une note d'état corporel (NEC) inférieure. A l'inverse, en se basant sur l'échelle de notation de l'état corporel de Henneke (de 1 à 9), l'étude de Garlinghouse et Burril (1999) montre une corrélation entre la distance parcourue et une NEC plus élevée parmi 360 chevaux sur des courses de 160 km. Ces résultats ne sont pas retrouvés dans la thèse de doctorat vétérinaire de Ménager (2010), qui ne met pas en évidence de relation significative entre le poids et la performance en course. Elle décrit, au contraire, que les individus éliminés présentent une NEC, selon la même échelle de notation, plus élevée (5,46) que les chevaux classés (5,2), avec une relation faiblement significative ($p < 0,1$).

Il ressort de ces conclusions que le cheval d'endurance doit présenter un état corporel moyen pour exprimer au mieux son potentiel en course. Il doit avoir suffisamment de tissu adipeux pour disposer des réserves en substrats énergétiques nécessaires à l'effort, mais sans en avoir une trop grosse épaisseur, puisque cela réduit les capacités de thermorégulation et est défavorable à la performance. En effet, l'épaisseur du pli cutané, qui rend compte de l'état d'embonpoint et de la finesse de la peau, présente une corrélation faiblement négative avec l'indice de distance dans l'étude de Tribout sur les chevaux de haut niveau (2013).

Le cheval d'endurance doit donc être léger, sans être maigre, mais sans excédent de masse grasseuse.

- *Conformation et allures d'endurance*

Diverses études ont été menées pour caractériser la morphologie adaptée des chevaux spécialisés dans une discipline équestre, en particulier concernant les chevaux de sport des trois disciplines olympiques, et les Pur-Sang de course (Langlois *et al.*, 1978). Les études épidémiologiques et morphométriques du cheval utilisé en endurance mettent pourtant en évidence quelques éléments de conformation considérés comme favorables à un exercice de longue durée.

Le principal critère valorisé dans l'allure d'un cheval d'endurance est l'économie d'énergie. Ce n'est donc pas l'esthétisme de l'allure qui est recherché, mais son efficacité. La foulée doit être symétrique, régulière, rasante et peu relevée. Selon Métayer *et al.* (2004), un cheval d'endurance performant présente une cadence élevée de foulées au trot et au galop, avec une forte propulsion longitudinale et un mouvement dorso-ventral limité. Or la conformation, à savoir la longueur et l'orientation des rayons osseux, détermine grandement la locomotion et la longueur des foulées. Un cheval d'endurance est plutôt fin et de petite taille, avec un dos assez court et creux, et un garrot saillant. Cette morphologie longiligne, qui s'accompagne généralement de rayons supérieurs et moyens (épaules, bras, avant-bras, tibia) longs et de rayons inférieurs (canons) courts, donne des allures rasantes (Gregory, 2014b).

Au niveau de l'avant-main, l'encolure joue un rôle crucial de balancier au galop, qui constitue l'allure de croisière des courses d'endurance, mais elle accumule de l'énergie élastique et sa stabilité aux différentes allures nécessite un effort actif (Zsoldos et Licka, 2015). Les chevaux d'endurance courent avec l'encolure libre, à la différence des chevaux de dressage pour lesquels la position d'encolure est travaillée. Elle doit ainsi être assez longue, mais sans surcharger l'avant main, sur laquelle l'insertion d'une épaule verticale favorise l'économie d'énergie dans le déplacement horizontal.

Sur l'arrière main, le cheval d'endurance semble présenter un bassin incliné et une hanche ouverte, c'est-à-dire un angle entre l'axe du bassin et le fémur ouvert pour faciliter l'engagement des postérieurs au galop (Métayer *et al.*, 2004), qui s'accompagne d'un fémur long et peu incliné par rapport à l'horizontale, et d'un jarret fermé (Barrey, 2003).

Concernant les membres, un cheval d'endurance doit disposer de membres plutôt courts et solides, avec des articulations larges et de bons pieds. Les anomalies d'aplomb ou d'allure, avec des chevaux qui billardent, harpent, lèvent les carpes ou frappent le sol, sont à éviter car elles entraînent une perte d'énergie inutile et sont associées à la survenue d'affections locomotrices (Paris *et al.*, 2021). Un cheval avec une mauvaise conformation ne serait compétiteur en endurance qu'à court terme ou bas niveau selon Misheff (2010).

Le cavalier joue aussi un rôle dans l'efficacité de l'allure, d'une part parce qu'il peut décider de l'allure à adopter selon le type de terrain ou l'inclinaison du sol (trot ou galop) mais aussi via sa position sur la selle (assise, enlevée, ou en deux points comme les jockeys de course). Le cavalier est maître de sa position relative par rapport aux oscillations d'allure du cheval. En endurance, plus un cavalier est expérimenté, plus les données d'accélérométrie collectées sur le couple illustrent une allure stable, à l'image de la position des jockeys qui est optimisée pour réduire l'impact du vecteur d'accélération du poids du cavalier dans le mouvement du cheval (Pfau *et al.*, 2009 ; Viry *et al.*, 2013).

b. Appréciation esthétique du cheval Arabe

- *Variations morphologiques entre lignées de race Arabe*

Au sein des chevaux de race Arabe, on recense des variations morphologiques entre les différentes lignées, notamment concernant les hauteurs au garrot et à la croupe et les longueurs d'encolure et de corps entier, chez 166 chevaux de lignées égyptienne, polonaise, et de la péninsule arabe ou « Desert Breed ». L'Arabe égyptien se distingue par une plus petite taille au garrot et à la croupe en comparaison à l'Arabe polonais et au Desert Breed. Ce dernier présente une morphologie plutôt carrée, tandis que l'Arabe polonais est plutôt longiligne, avec une encolure proportionnellement plus longue que les deux autres lignées (Machmoum *et al.*, 2019).

L'étude de Sobczuk et Komosa (2012) se focalise, elle, sur les chevaux Arabe d'une même lignée polonaise et met aussi en évidence des variations morphologiques entre les produits de différents élevages. Les critères de variation les plus marqués concernent la longueur des métatarses et du bassin, qui sont favorables à la puissance de l'arrière main ; et la profondeur du thorax et de l'encolure, qui peuvent être liés à la capacité d'oxygénation et d'évaporation thermique par les voies respiratoires. Ces différences morphologiques peuvent résulter de la volonté des éleveurs d'améliorer leurs produits pour une utilisation spécifique : sportive ou esthétique.

En ce sens, une étude sur les chevaux Arabes de lignée espagnole compare la morphologie de 171 chevaux dont l'élevage est orienté pour le show, pour l'endurance, ou pour d'autres loisirs. Parmi les 37 dimensions et angles évalués sur chaque cheval, il apparaît que tous les chevaux Arabes partagent une conformation globale similaire, mais que les chevaux de show affichent une encolure plus longue, une insertion de queue plus haute sur la croupe, et un angle du jarret plus ouvert. Les chevaux destinés à l'endurance présentent, eux, un thorax moins large, une pointe de la fesse plus basse et un genou plus proche de la pointe de la hanche. Cette conformation du membre postérieur donne un effet de ressort qui pourrait être favorable à une plus grande amplitude de foulée et une meilleure propulsion. (Cervantes *et al.*, 2009)

- *Concours modèle et allures de la SHF*

Face à cette diversité morphologique et de qualités des lignées d'une même race, et en raison d'une demande des éleveurs français d'obtenir des arguments morphologiques précis de sélection de leurs reproducteurs dans une optique de performance et d'amélioration de la race ; les grandes entités de la discipline d'endurance se réunissent, chaque année, à l'occasion des épreuves jeunes chevaux. Ces épreuves sont organisées par la Société Hippique Française, dont l'objectif est de promouvoir les chevaux d'endurance, en partenariat avec l'Association française du Cheval Arabe, qui oriente la sélection pour ses nombreux éleveurs adhérents. Elles regroupent une évaluation esthétique de la conformation et des allures des jeunes chevaux, ainsi que des courses « d'aptitude à l'endurance » et témoignent d'un rapport étroit entre la conformation et les qualités sportives.

Durant ces concours, les jeunes chevaux sont regroupés par tranches d'âge de 4, 5 ou 6 ans. Les chevaux sont présentés en main devant un jury, qui juge d'abord le modèle et les aplombs. Le jeune cheval évolue ensuite en main sur deux allers-retours en ligne droite, au pas puis au trot. Enfin, il est observé dans un couloir circulaire, au galop en liberté, afin d'apprécier ses allures naturelles. Des points sont attribués à des critères morphologiques prédéfinis, puis pondérés avec des coefficients de 1 à 3 pour l'obtention d'une note finale. Les grilles de notation sont présentées en annexe 1.

D. Approche sélective pour l'amélioration des performances en endurance

La sélection génétique des reproducteurs dans une optique d'amélioration de la race pour performer dans une discipline est une science complexe. Elle nécessite au préalable d'identifier des critères d'intérêt associés à la performance recherchée, puis d'évaluer leur transmission à la descendance, en identifiant si possible le ou les gènes impliqués dans l'expression de ces critères phénotypiques. L'intérêt de ces critères dans un plan de sélection peut ensuite être discuté.

a. L'héritabilité, notion centrale de la sélection génétique

L'héritabilité est la part de la variabilité d'un critère d'intérêt qui est régie par la génétique et donc transmissible à la descendance (Lush, 1949). Elle est noté h^2 et s'exprime en valeur de 0 à 1. Elle permet de déterminer si un critère est intéressant ou non dans un plan de sélection. Elle varie selon le caractère phénotypique observé, selon la population étudiée, et peut varier au cours du temps pour un caractère donné dans une population donnée (Bailey, 2014).

On distingue des critères d'héritabilité faible (entre 0 et 0,2), moyenne (entre 0,2 et 0,6) ou forte (supérieure à 0,6). L'héritabilité est souvent accompagnée d'une valeur de répétabilité, qui illustre la corrélation entre deux paramètres identiques évalués sur un même individu dans deux contextes différents. La répétabilité constitue la limite maximale de l'héritabilité, pour un critère quantitatif influencé par l'environnement (Barthélémy, 2020).

Au sein des différentes activités équestres, l'héritabilité de très nombreux critères de performances a été estimée : nous en détaillons quelques exemples dans la suite.

b. L'héritabilité des performances équestres

• Gains et paramètres de course

L'héritabilité basée sur les gains en dressage et concours complet est moyenne, respectivement estimée à 0,34 et 0,14, chez le Selle Français (Dubois et Ricard, 2007). Dans les disciplines de course, l'héritabilité des gains totaux de carrière des Quarter Horse est estimée à 0,21 (Silva *et al.*, 2014), et entre 0,19 et 0,28 chez les Pur-sang de galop (Langlois *et al.*, 1996 ; Velie *et al.*, 2015). Chez les trotteurs, l'héritabilité des temps chronométriques de course estimée à 0,32 est modérée (Suontama *et al.*, 2012).

• Locomotion et allures

Inspirées de l'Homme, pour qui l'héritabilité des qualités athlétiques (longueur de foulée, temps de sprint, saut en hauteur et longueur) est estimée à plus de 0,40 ; des études se sont focalisées sur la locomotion des chevaux. Elles décrivent des héritabilités fortes pour la longueur de foulée aux trois allures, estimées entre 0,61 et 0,67, et moyennes pour la vitesse au pas et au trot, estimées entre 0,41 et 0,43 (Barrey, 1992).

La qualité esthétique des allures de dressage de jeunes Pure Race Espagnols révèle en revanche une héritabilité allures naturelles (cheval en liberté) estimée à 0,22 en liberté, et des allures montées à 0,30 (Ripollés-Lobo *et al.*, 2022).

La durée de planer à l'obstacle en liberté chez le jeune Selle Français présente une héritabilité estimée à 0,30 (Barrey, 2014)

Les critères de performance évoqués précédemment sont multiples et parfois subjectifs. Or, les indices de performance, notamment en endurance, peuvent servir de caractères quantitatifs et objectifs sur lesquels appliquer une sélection génétique, à condition d'avoir une bonne héritabilité.

c. L'héritabilité des performances en endurance

L'héritabilité des performances sur des épreuves de 90 à 160 km a été évalué à 0,28 pour le critère de vitesse et 0,06 pour le classement, avec une répétabilité respective de 0,44 et 0,07 (Ricard et Touvais, 2007). Le trait de vitesse est donc moyennement héréditaire en endurance, mais l'est davantage que dans les autres disciplines.

L'endurance se démarque aussi des autres disciplines équestres puisque le résultat d'une unique performance en course est faiblement héréditaire (héritabilité 0,10) avec une faible similarité d'une course à l'autre (répétabilité de 0,12). A l'inverse, en CSO ou en dressage, par exemple, les résultats d'une unique performance, voire de caractéristiques accélérométriques lors des tests d'épreuve et d'aptitude chez de jeunes étalons, affichent une meilleure héritabilité que les résultats de compétition, tout en montrant une bonne corrélation avec les performances futures en compétition (Doyle *et al.*, 2022 ; Hellsten *et al.*, 2006 ; Ricard *et al.*, 2020b).

La corrélation entre les performances évaluées sur les jeunes chevaux et les performances futures est importante puisqu'elle permet d'optimiser la sélection dans le temps. Plus les reproducteurs améliorateurs sont identifiés tôt, plus précoce est la sélection, et plus court est l'intervalle entre les générations sélectionnées.

d. Intérêts de l'étude des jeunes chevaux

Si l'indice génétique permet en effet de quantifier précocement les qualités d'améliérateurs d'un individu en se basant sur les performances de ses apparentés, il est intéressant de définir des critères de la performance réelle spécifiques aux jeunes chevaux. Par exemple, les jeunes chevaux d'endurance n'ayant accès qu'à des épreuves à vitesse contrôlée, la vitesse n'est pas un bon critère d'étude. Les concernant, c'est l'héritabilité du niveau maximal atteint à l'âge de 5 ou 6 ans qui est étudiée, et estimée à 0,22 (Ricard et Touvais, 2007).

Un argument pouvant souligner l'efficacité des plans de sélections français dans l'amélioration des performances en endurance est que, dans l'étude de Ricard et Touvais, une plus grande vitesse est relevée chez les chevaux Arabes provenant de régions françaises considérées comme bassin d'élevage de chevaux d'endurance (Languedoc-Roussillon, Rhône-Alpes, Midi-Pyrénées, et Bretagne).

e. A la recherche d'autres critères associés à la performance et d'héritabilité plus élevée

Dans l'étude de Younes *et al.* (2014), l'héritabilité du temps moyen de récupération cardiaque est estimée à 0,46. Or, le temps moyen de récupération cardiaque est directement lié à la contre-performance, puisqu'elle peut être responsable d'élimination ; mais aussi à la performance, puisque sur certaines épreuves, le chronomètre de chaque boucle ne s'arrête qu'à l'entrée dans la zone vétérinaire, et la fréquence cardiaque finale obtenue peut impacter le classement lors d'*ex aequo*. Un meilleur temps de récupération cardiaque favorise donc la vitesse et le classement des chevaux, et l'étude suggère que ce critère pourrait être un critère de sélection précoce pour améliorer les performances des chevaux d'endurance (Younes *et al.*, 2014).

D'autre part, Detilleux explique que, chez le cheval, l'héritabilité des caractères morphologiques est plus élevée que celle des performances de course. Par exemple, l'héritabilité de la hauteur au garrot varie de 0,49 à 0,78 selon des études et les races (Detilleux, 2022). Le tableau suivant regroupe quelques héritabilités de caractères morphologiques estimés dans les études réalisées sur des échantillons de chevaux Pur-sang Arabes ou croisés Arabes.

Tableau 5 : Estimation des héritabilités de traits morphologiques dans plusieurs échantillons de chevaux Arabes ou croisés Arabes

Caractéristique morphologique	Héritabilité estimée	Race étudiée	Référence
Hauteur au garrot	0,78	Anglo-arabe de Sardaigne	(Giontella et al., 2020)
	0,57	Pur-sang arabe iranien	(Gharahveysi et al., 2008)
	0,48	Pur-sang arabe	(Seidlitz et al., 1991)
Périmètre thoracique	0,47	Anglo-arabe de Sardaigne	(Giontella et al., 2020)
	0,31	Pur-sang arabe	(Seidlitz et al., 1991)
	0,13	Pur-sang arabe iranien	(Gharahveysi et al., 2008)
Hauteur à la croupe	0,61	Pur-sang arabe iranien	(Gharahveysi et al., 2008)
Longueur de l'épaule	0,34	Anglo-arabe de Sardaigne	(Giontella et al., 2020)
Circonférence du canon	0,57 (antérieur)	Anglo-arabe de Sardaigne	(Giontella et al., 2020)
	0,51 (antérieur)	Pur-sang arabe	(Seidlitz et al., 1991)
	0,05 (antérieur)	Pur-sang arabe iranien	(Gharahveysi et al., 2008)
	0,19 (postérieur)		

Les critères de morphologie, dans ces études, ont une héritabilité moyenne à forte, mais la conformation des membres présente une héritabilité plus faible. L'héritabilité est par ailleurs plus précise sur des traits de conformation mesurés et quantitatifs par rapports aux appréciations subjectives et qualitatives (Ghavi Hossein-Zadeh, 2021).

f. Relation entre la conformation et indices de performance en endurance

Les études les plus récentes de morphologie des chevaux Arabes ou croisés Arabes et leur relation avec les performances en endurance datent de 2013 et 2015, respectivement à travers les travaux de thèse de Doctorat vétérinaire de Tribout et Triquenaux. En plus de donner des modèles de mesures morphologiques de jeunes chevaux de 4 à 6 ans et d'adultes de haut niveau, et d'évaluer les modifications liées à la croissance, ces études s'orientent vers la détermination de critères morphologiques associés à la performance, dans une optique de sélection génétique.

Tribout utilise les indices IRE 2012 et les résultats immédiats en compétition de haut niveau de 367 chevaux adultes de plus de 7 ans. Triquenaux s'appuie, elle, sur 533 résultats aux épreuves jeunes chevaux de la SHF, dont le classement final dépend d'une appréciation qualitative du modèle par un jury, mais elle dispose aussi, exclusivement pour les chevaux de 6 ans, des indices IRE 2012. L'ensemble des corrélations significatives et tendances obtenues dans ces deux études sont résumées dans le tableau 6.

Tableau 6 : Bilan des corrélations significatives et tendances entre la conformation et les indices de performance chez le cheval Arabe jeune et adulte (Tribout, 2013 ; Triquenaux, 2015)

Conformation du <u>jeune cheval</u> et de <u>l'adulte</u>		Indicateurs de performance à court terme			
		IRE	Indice Vitesse	Indice Classement	Indice Distance
Mensurations	Longueur corporelle	X	X	X	$r = 0,13$ ($p = 0,035$)
	Pli cutané	X	X	X	$r = -0,15$ ($p = 0,032$)
Indices corporels	Indice corporel de profil (Hauteur au garrot / Longueur corporelle)	X	X	X	$r = -0,11$ ($p = 0,059$)
Morphométrie	Inclinaison axe creux du garrot – dos par rapport à l'horizontale	X	$r = 0,59$ ($p = 0,02$)	X	X
	Hauteur du garrot – creux du dos	$r = 0,56$ ($p = 0,03$)	$r = 0,54$ ($p = 0,03$)	X	X
	Inclinaison du fémur par rapport horizontale	X	$r = -0,14$ ($p = 0,051$)	X	X
	Angle du grasset	X	X	X	$r = -0,14$ ($p = 0,041$)

IRE = Indice en Raid d'Endurance ; r = coefficient de corrélation ; p = p-value

- *Morphologie globale*

Si Métayer *et al* (2004) ne mettent pas en évidence de différence significative de morphologie globale entre les chevaux d'endurance, toutes races confondues, de niveau national et pré-national ; il apparaît cependant dans le travail de thèse de Tribout (2013) qu'un cheval long a plus de chance d'être qualifié sur de longues distances. Cette corrélation pourrait être expliquée par le fait qu'un cheval long a, d'une part, des foulées de plus grande amplitude au galop, et d'autre part, une surface corporelle plus grande, favorisant la thermorégulation. Cette dernière est d'autant plus efficace que l'épaisseur cutanée est faible et cela pourrait expliquer le second résultat obtenu dans cette étude concernant la corrélation négative entre l'épaisseur de pli cutané et l'indice de distance.

La hauteur au garrot n'est pas corrélée à la performance dans cette étude, mais une tendance semble favoriser les chevaux Arabe longilignes, dont l'indice corporel de profil (inférieur à 1) est d'autant plus faible, à de meilleurs indices de distance.

- *Angulation des rayons osseux*

Tribout met aussi en évidence une corrélation, bien que faible, entre l'indice de vitesse et une faible inclinaison du fémur par rapport à l'horizontale. Elle explique qu'une orientation du fémur proche de la verticale augmente la fréquence des foulées, avec un déplacement dorso-ventral limité, mais cette conformation est favorable à une allure économique au détriment de la puissance et de l'amplitude, qui sont les critères majeurs pour améliorer la vitesse au trot et au galop d'endurance. (Barrey, 1992). En ce sens, Colin de Verdière (2014) met en évidence dans son travail de thèse portant sur l'analyse d'enregistrements d'allures de chevaux d'endurance au départ d'une course, en présentation au pas et au trot, que l'amplitude de mouvement dorso-ventral à chacune des deux allures est corrélée positivement à tous les indices de performance.

De plus, l'angle du grasset est significativement corrélé à l'indice de distance : les chevaux ayant un angle du grasset plus fermé auraient un indice distance plus élevé. Tribout suggère qu'une telle morphologie de l'articulation du grasset favoriserait une propulsion horizontale et donc des gestes rasants, vers l'avant, favorables à l'endurance (Métayer *et al.*, 2004), bien qu'une analyse des allures soit nécessaire pour confirmer cette hypothèse.

- *Chez le jeune cheval de 6 ans*

Si l'on s'intéresse spécifiquement aux jeunes chevaux, l'étude de corrélation entre la conformation et la performance via les indices IRE de Triquenaux n'a pu être réalisée que sur les chevaux de 6 ans, dont la morphologie est cependant comparable à celle des chevaux adultes. En effet, les chevaux Arabes font partie des races qui finissent plutôt précocement leur croissance, avec peu de modifications morphologiques après l'âge de 4 ans (Triquenaux, 2015). La principale caractéristique morphologique mise en évidence est la prééminence du garrot, qui est positivement corrélée à l'indice de vitesse et à l'IRE global. La prééminence du garrot est évaluée par l'inclinaison de l'axe entre le garrot et le creux du dos par rapport à l'horizontale, et la différence de hauteur entre ces deux repères anatomiques.

En s'inscrivant dans la suite des travaux de Triquenaux et Tribout, il convient de s'intéresser à l'existence de facteurs morphologiques et/ou morphométriques, évaluables chez le jeune cheval d'endurance, qui seraient associés à la performance à long terme dans la discipline, évaluée sur la carrière complète des chevaux, et sur lesquels une sélection génétique précoce et efficace pourrait être envisagée.

Deuxième partie : étude expérimentale

1. Introduction

L'élevage du cheval d'endurance est, comme tout élevage, en demande de facteurs précis, quantifiables, permettant d'effectuer une caractérisation précoce des produits pour réaliser une sélection la plus efficace possible. Si les finales nationales organisées par la SHF s'inscrivent justement dans cette démarche pour valoriser les jeunes chevaux performants, il convient aussi d'évaluer si les critères évalués sur les chevaux de 4 à 6 ans sont en relation avec leur performance à plus long terme.

Ce travail s'inscrit dans la continuité de plusieurs études menées dans le cadre du projet GenEndurance, et en particulier les thèses de Doctorat Vétérinaire de Maud Triquenaux (2015), portant sur la morphologie du jeune cheval d'endurance en relation avec sa performance à court terme ; et de Pauline Tribout (2014), sur la morphométrie du cheval Arabe ou croisé Arabe en lien avec la performance en course d'endurance. La présente étude aborde un regard rétrospectif sur la carrière de chevaux ayant dépassé dix ans d'âge et dont les mensurations et données morphométriques ont été relevées à l'âge de 4 à 6 ans.

L'objectif de notre étude est ici d'explorer les caractéristiques morphologiques ou conformationnelles, mesurables sur les jeunes chevaux, qui seraient associées à la performance ou la contre-performance à long terme, chez le cheval d'endurance de race Arabe et croisé Arabe.

2. Matériels et méthodes

A. Population de l'étude

La collecte des données a été réalisée de 2011 à 2014 à l'occasion des finales nationales jeunes chevaux organisées par la Société Hippique Française à Uzès (30, Gard) chaque automne. L'étude porte sur un échantillon de 489 chevaux d'endurance, âgés de 4, 5 ou 6 ans lors de la collecte des données, ayant au moins un ascendant de race Arabe, et recrutés sur la base du volontariat.

B. Protocole expérimental

a. Données d'identité individuelles

Les informations relatives à l'identité de chaque cheval ont été collectées à partir des données FFEcompét et SIRE, à savoir : nom, numéro d'identification SIRE, numéro de transpondeur, âge, sexe, race et noms des ascendants directs (père et mère).

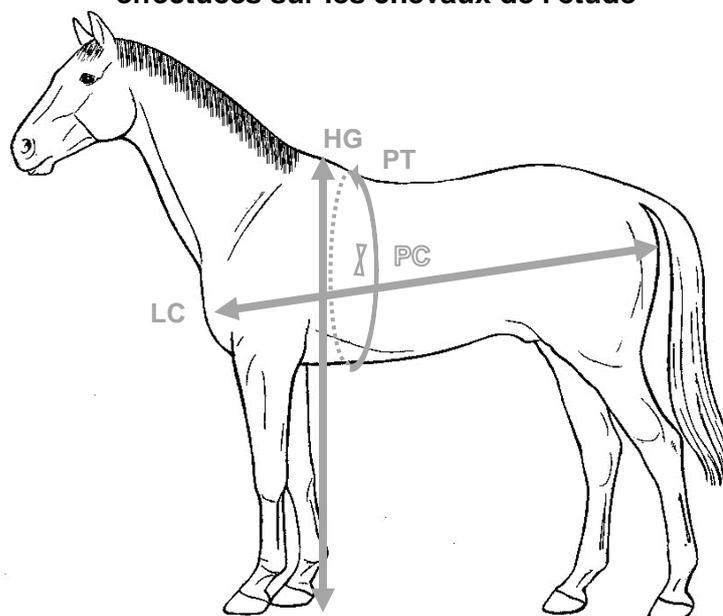
b. Données morphologiques

• Mesurations

Chaque année, et dans des conditions répétables décrites par Triquenaux (2015), les mensurations suivantes ont été collectées sur les chevaux :

- La hauteur au garrot (HG) en cm, mesurée à l'aide d'une toise ;
- La longueur du corps (LC) en cm, mesurée à l'aide d'un mètre ruban entre la pointe de l'épaule et la pointe de la fesse ;
- Le périmètre thoracique (PT) en cm, mesuré à l'aide d'un mètre ruban au niveau du passage de sangle en fin d'expiration ;
- L'épaisseur du pli cutané (PC) en mm, mesuré à l'aide d'un pied à coulisse, en arrière de l'épaule, à mi-hauteur du thorax, derrière le triceps.

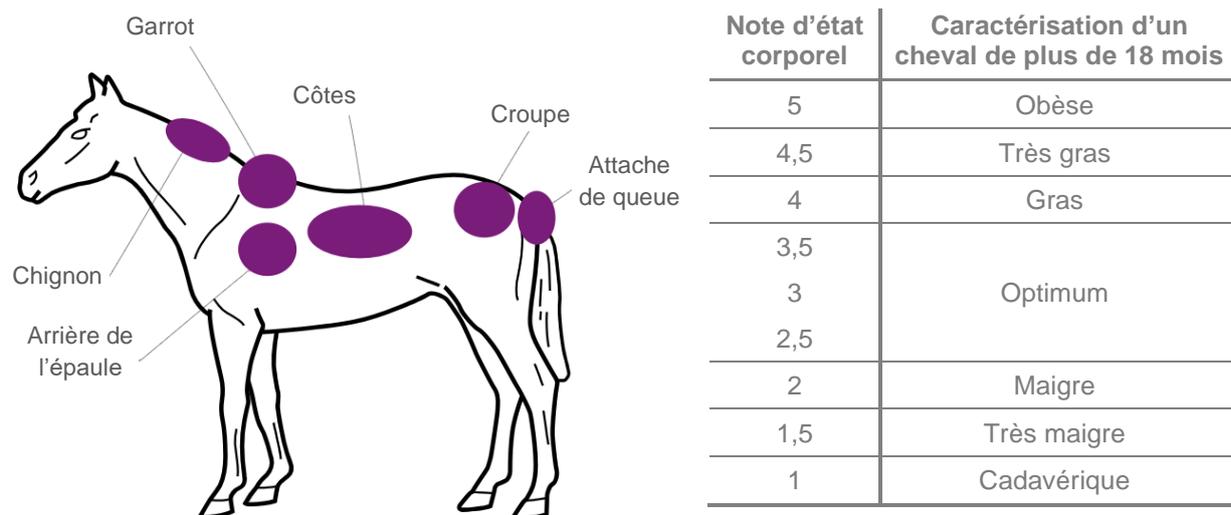
Figure 10 : Schéma des différentes mesures morphologiques effectuées sur les chevaux de l'étude



- *Etat corporel*

Le poids de chaque cheval a été mesuré à l'aide d'une balance, en kilogramme (kg), et une note d'état corporel a été attribuée selon le système de notation validé par l'IFCE pour les chevaux de plus de 18 mois. Cette évaluation consiste à apprécier visuellement le cheval dans son ensemble, mais aussi par palpation du dépôt adipeux au niveau de trois à six régions corporelles identifiées, que sont : le chignon, le garrot, l'arrière de l'épaule, les côtes, l'attache de la queue et la croupe ; et résulte en l'attribution d'une note entre 0 et 5 (Doligez *et al.*, 2023 ; IFCE, 2016).

Figure 11 : Régions corporelles d'intérêt dans la notation et caractérisation de l'état corporel



c. Mesures photométriques

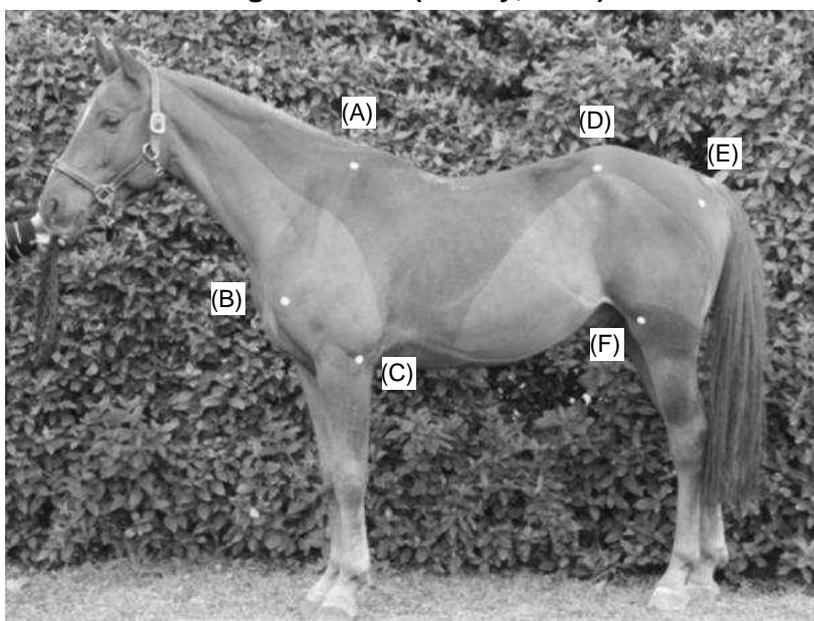
Les mesures photométriques ont été obtenues à l'aide du logiciel informatique EQUIMETRIX à partir d'une photographie numérique du cheval de profil, les membres bien placés au carré.

- *Acquisition des images*

Des gommettes sont préalablement placées sur les six repères anatomiques d'intérêt suivants :

- (A) le sommet de l'épaule : sommet de la scapula à l'extrémité du cartilage, dans le prolongement de l'épine scapulaire ;
- (B) la pointe de l'épaule : au niveau de la convexité du tubercule majeur de l'humérus ;
- (C) le coude : à l'insertion humérale du ligament collatéral latéral ;
- (D) la pointe de la hanche : sur la tubérosité dorso-crâniale de l'épine iliaque ;
- (E) la hanche sur la convexité du grand trochanter ;
- (F) le grasset : à l'insertion proximale du ligament patellaire latéral.

Figure 12 : Photographie légendée des repères placés avec des gommettes (Barrey, 2002)



Un placement correct du cheval est ensuite primordial : il doit être parfaitement au carré, ses sabots formant un rectangle au sol et ses canons étant verticaux. L'appareil photographique est placé perpendiculairement à l'axe du cheval et éloigné de dix mètres. Un sol plat, un fond d'image sobre et neutre, et un lieu bien éclairé sont aussi exigés. Plusieurs photographies sont réalisées sur chaque cheval et celle affichant le meilleur placement du cheval est choisie pour le traitement informatique.

- *Traitement informatique des images*

Les photographies numériques ont un format JPEG, avec une définition de 640 x 480 pixels.

A l'aide du logiciel EQUIMETRIX, les repères anatomiques sont pointés sur la photo dans l'ordre exact suivant :

- 1) Ligne du dessus :
 - a. centre du naseau,
 - b. aile de l'atlas,
 - c. sommet du garrot,
 - d. point le plus bas du dos,
 - e. sommet de la croupe ;
- 2) Membre thoracique :
 - a. extrémité proximale de la scapula,
 - b. convexité du tubercule majeur de l'humérus,
 - c. insertion du ligament collatéral latéral de l'articulation du coude,
 - d. processus styloïde ulnaire du radius,
 - e. intersection entre la partie distale de la branche latérale du ligament suspenseur et du ligament annulaire palmaire,
 - f. extrémité distale de la pince ;
- 3) Membre pelvien :
 - a. tubérosité dorsale de l'épine iliaque ventro-crâniale,
 - b. convexité du grand trochanter du fémur,
 - c. insertion proximale du ligament patellaire latéral,
 - d. malléole latérale du tibia,
 - e. intersection entre la partie distale de la branche latérale du ligament suspenseur et le ligament annulaire plantaire,
 - f. extrémité distale de la pince.

Figure 13 : Photographie légendée illustrant les marqueurs placés via le logiciel EQUIMETRIX (Barrey 2002)

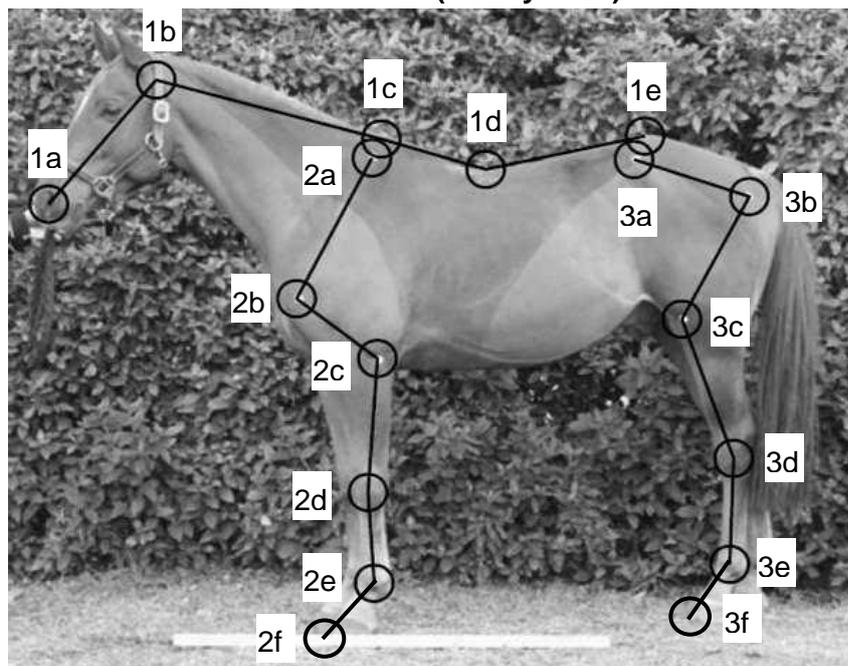


Tableau 7 : Nom, description, et unité de chaque variable morphométrique

Variable	Définition	Unité
TAILLE		
TAILLEC	Taille au sommet de la croupe	m
VIDESST	Vide sous-sternal	m
THORAX	Hauteur de la poitrine	m
LIGNE DU DESSUS		
TETE	Longueur entre l'atlas et le naseau	m
ENCOLURE	Longueur entre l'atlas et le garrot	m
LONGUEUR	Longueur entre l'épaule et la hanche	m
LONGUEURtot	Longueur entre la base de l'encolure et la pointe de la fesse	m
IEPAULEPOINTEHANCHE	Inclinaison de l'axe formé par l'épaule et la pointe de la hanche par rapport à l'horizontale	degrés
ICOUDEGRASSET	Inclinaison coude-grasset/horizontale	degrés
DOS		
DOSAV	Longueur entre le garrot et le creux du dos	m
DOSARR	Longueur entre le creux du dos et le sommet de la croupe	m
ADOS	Angle entre le garrot, le creux du dos et le sommet de la croupe	degrés
HGARROT	Hauteur du garrot par rapport au creux du dos	m
IGARROT	Inclinaison de l'axe formé par le creux du dos et le garrot par rapport à l'horizontale	degrés

Figure 14 : Photographies légendées des variables de taille et de la ligne du dessus

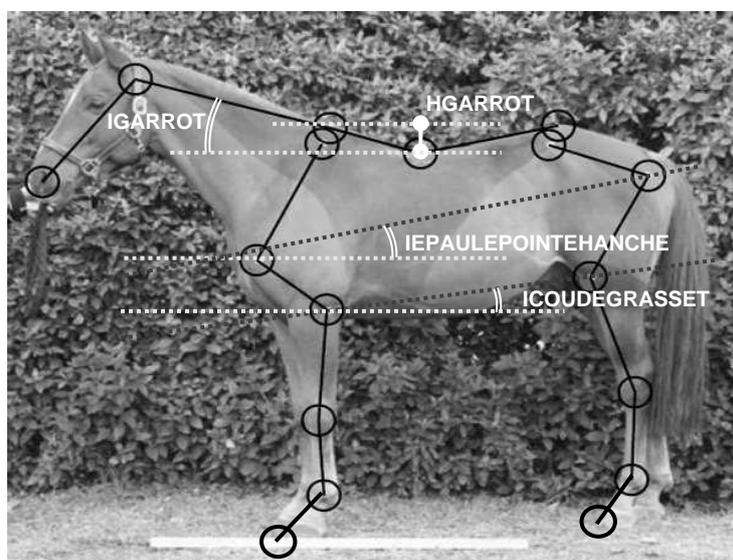
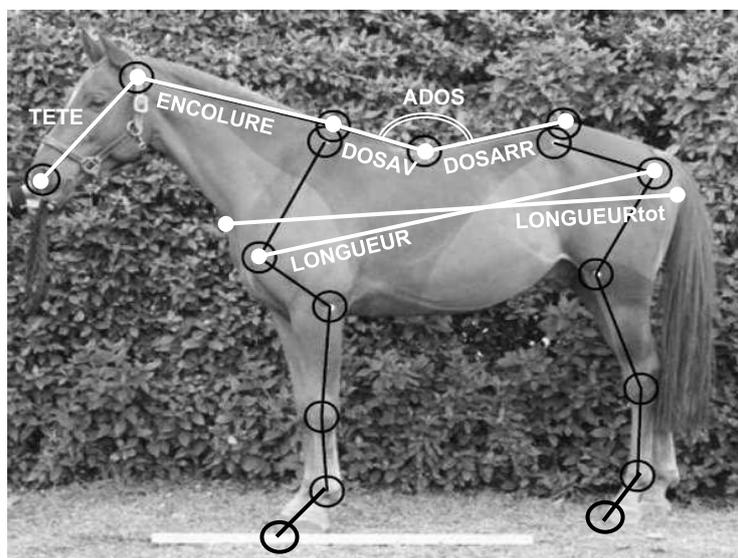
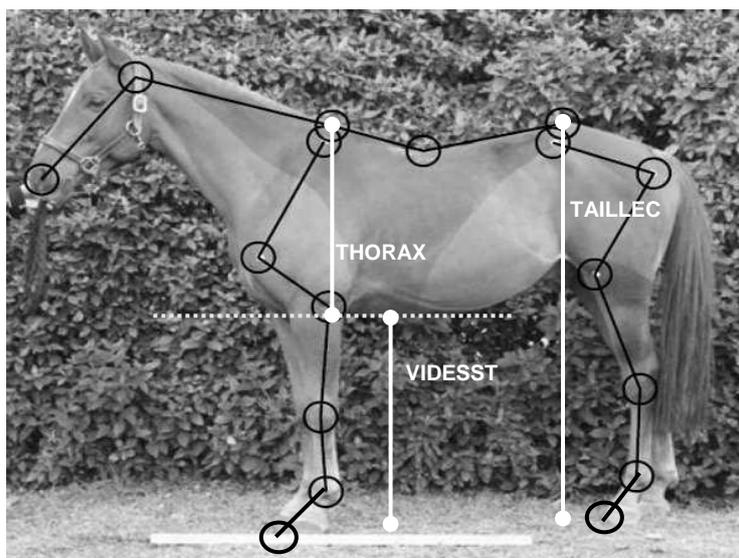
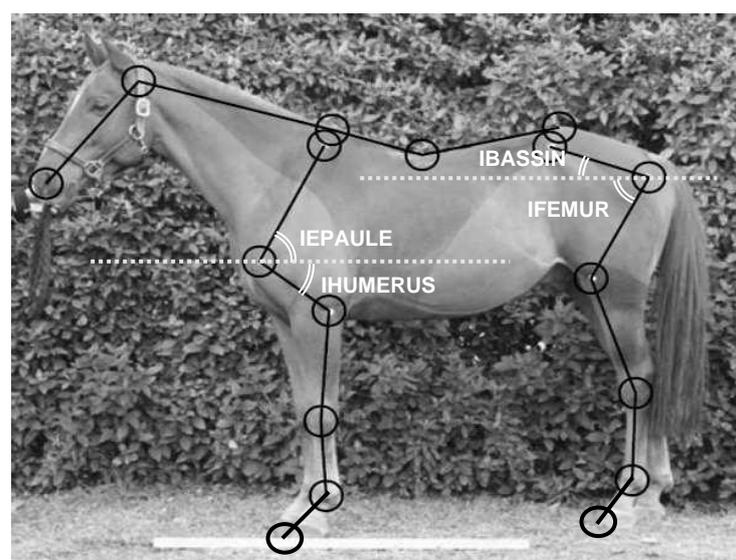
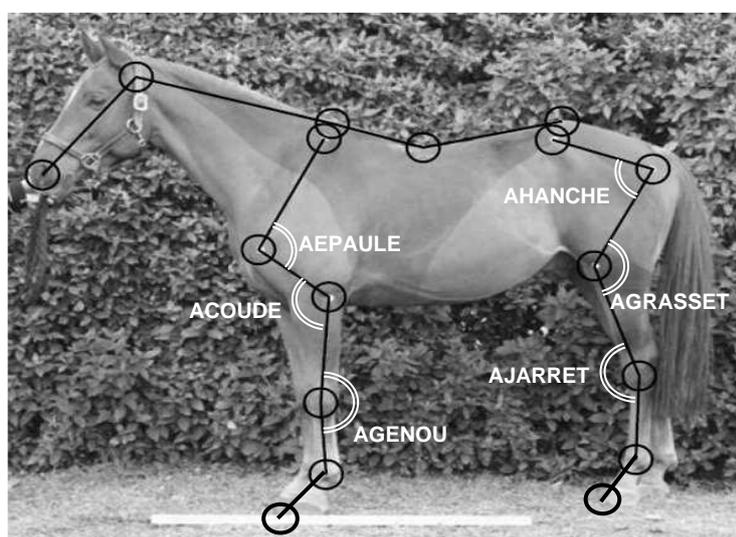
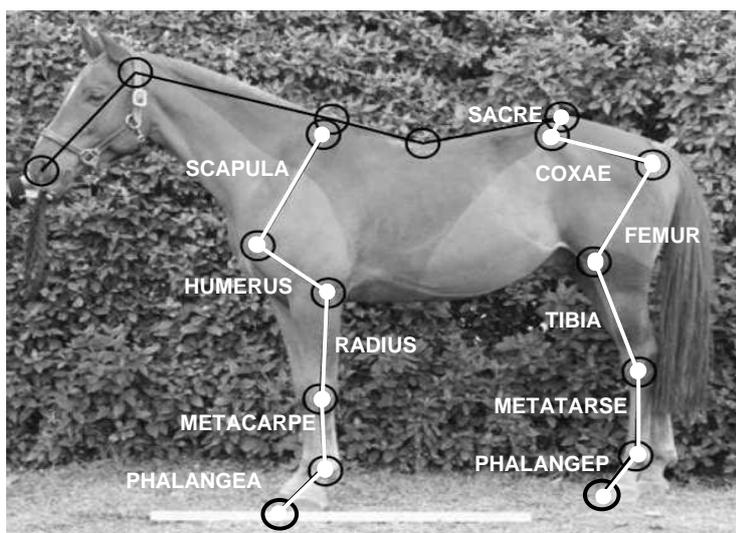


Tableau 8 : Suite de Nom, description, et unité de chaque variable morphométrique

Variable	Définition	Unité
ANTERIEURS		
Segments		
SCAPULA	Longueur de l'épaule	m
HUMERUS	Longueur de l'avant-bras	m
RADIUS	Longueur du bras	m
METACARPE	Longueur du canon antérieur	m
PHALANGEA	Longueur entre le boulet et la pince antérieure	m
Angles et inclinaisons		
IEPAULE	Inclinaison de la scapula	degrés
IHUMERUS	Inclinaison de l'humérus	degrés
AEPAULE	Angle de la scapula	degrés
ACOUDE	Angle du coude	degrés
AGENOU	Angle du carpe	degrés
POSTERIEURS		
Segments		
SACRE	Longueur entre le sommet de la croupe et la hanche	m
COXAE	Longueur entre la pointe de la hanche et la hanche	m
FEMUR	Longueur du fémur	m
TIBIA	Longueur du tibia	m
METATARSE	Longueur du canon postérieur	m
PHALANGEP	Longueur entre le boulet et la pince postérieure	m
Angles et inclinaisons		
IBASSIN	Inclinaison du bassin par rapport à l'horizontale	degrés
IFEMUR	Inclinaison du fémur par rapport à l'horizontale	degrés
AHANCHE	Angle entre le bassin et le fémur	degrés
AGRASSET	Angle du grasset	degrés
AJARRET	Angle du jarret	degrés

Figure 15 : Photographies légendées des variables morphologiques des lignes antérieure et postérieure



d. Variables morphologiques et morphométriques calculées

- *Indices corporels calculés*

A partir des mensurations pré-décrites, des indices corporels sont calculés pour mieux caractériser la conformation globale des chevaux. Trois indices sont ainsi ajoutés aux données individuelles des chevaux :

- L'indice corporel relatif : $IC\ RELATIF = \frac{\text{Périmètre thoracique } PT}{\text{Longueur corporelle } LC}$
- L'indice corporel de profil : $IC\ PROFIL = \frac{\text{Hauteur au garrot } HG}{\text{Longueur corporelle } LC}$ qui permet de distinguer les chevaux brévilignes, plus hauts que longs ($IC > 1$), des chevaux médiolignes s'inscrivant dans un carré ($IC = 1$), et des chevaux longilignes, plus longs que hauts ($IC < 1$).
- L'indice de compacité : $IC\ COMPACTE = \frac{\text{Hauteur au garrot } HG}{\text{Poids } P}$ exprimé en m/kg. Par exemple, les chevaux Arabes Barbe (0,38) sont plus compacts que les Anglo-arabes (0,36), eux-mêmes plus compacts que les demi-selle Normands (0,28) dans une étude portant sur un échantillon de chevaux Barbe de Tunisie (Chabchoub *et al.*, 2004).

- *Surfaces corporelles calculées*

Il est connu depuis longtemps que le métabolisme de base d'un être vivant est proportionnel à sa surface (Kleiber, 1961), et c'est la surface corporelle qui intervient dans les mécanismes de thermorégulation des chevaux, comme décrit dans la précédente partie. Plusieurs équipes de chercheurs ont défini des formules mathématiques d'estimation de la surface corporelle à partir du poids des chevaux. Dans notre étude, nous utilisons deux d'entre elles :

- La formule de HODGSON (unpublished data) qui exprime la surface corporelle (S) en mètre carré m² à partir du poids du cheval P exprimé en kilogramme :

$$S_{HODGSON} = 1,09 + 0,008 \times P$$

- La formule de BRODY, où P est le poids en gramme et S la surface en centimètre carré cm² (Brody et Lardy, 1946) :

$$S_{BRODY} = 0,1 \times P^{0,644}$$

Pour chaque surface est ensuite défini un indice surfacique (IS) comme le rapport entre le poids du cheval et sa surface corporelle, exprimé en kg/m², notés respectivement IS_{HODGSON} et IS_{BRODY} :

$$IS = \frac{P}{S}$$

Si l'on prend l'exemple de deux chevaux, l'un pesant 400 kg et l'autre 500 kg : ce dernier est 25 % plus lourd, mais sa surface corporelle n'augmente, selon la formule utilisée, que de 19 % (Hodgson : 5,09 m² versus 4,29 m²) ou 15 % (Brody : 5,47 m² versus 4,74 m²). Si l'on exprime la surface corporelle relativement au poids, alors l'indice surfacique pour une telle différence de poids de 100 kg n'augmente que de 5 % (Hodgson : 98,23 kg/m² versus 93,24 kg/m²) à 8 % (Brody : 91,41 kg/m² versus 84,39 kg/m²).

- *Rapports corporels*

Les jurys accordent un intérêt tout particulier à l'harmonie créée par les proportions du membre antérieur par rapport au thorax et par les rapports entre les segments formant le triangle postérieur. Les variables décrites dans le tableau 9 sont donc calculées à partir des mesures morphométriques :

Tableau 9 : Nom et description des rapports morphométriques étudiés

Variable	Définition
RAPPORTS	
RADIUS/METACARPE	Longueur du radius par rapport à la longueur du métacarpe
RADIUS/HG	Longueur du radius par rapport à la hauteur au garrot
THORAX/HG	Hauteur du thorax par rapport à la hauteur au garrot
HG/TAILLEC	Hauteur au garrot par rapport à la hauteur à la croupe
SEGMENTS POSTERIEURS	
GRASSETPTEHANCHE	Longueur entre le grasset et la pointe de la hanche (en m)
COXAE/FEMUR	Longueur entre l'articulation de la hanche et la pointe de la hanche par rapport à la longueur du fémur
COXAE/GRASSETPTEHANCHE	Rapport des longueurs de l'articulation de la hanche à la pointe de la hanche avec celle du grasset à la pointe de la hanche
FEMUR/GRASSETPTEHANCHE	Longueur du fémur par rapport à la longueur entre le grasset et la pointe de la hanche

e. Résultats individuels à long terme dans la discipline d'endurance

- *Chevaux avec indices de performance*

Grâce à l'IFCE, nous disposons des Indices de performances en Raid d'Endurance (IRE) 2019, calculés sur la carrière française de la majorité des chevaux, jusqu'en 2019. Les chevaux indicés disposent de quatre indices accompagnés de leur coefficient de détermination, et où l'indice global est une pondération des indices de vitesse, classement, et distance, comme décrit dans la partie bibliographique. Seuls les chevaux présentant un coefficient de détermination de l'IRE supérieur ou égal à 0,6 sont conservés dans le groupe des chevaux indicés.

A chaque cheval indicé est aussi attribué le nombre d'engagements en compétition (SORTIE), le nombre de classements (CLASSE), la distance maximale d'épreuve sur laquelle il a été engagé (MAX. DIST), la distance maximale d'épreuve sur laquelle il s'est classé (MAX. DIST PLACE), et l'année maximale des dernières performances enregistrées (MAX. AN. PERF.).

- *Chevaux sans indice de performance*

Pour les chevaux qui ne réalisent pas ou trop peu de compétitions d'endurance en France, l'indice n'est pas disponible. Ils forment le groupe des chevaux non indicés. Notons que certains chevaux ont tout de même une carrière en endurance au niveau international, mais dans des régions où les résultats ne sont pas accessibles au SIRE pour l'attribution d'indices IRE. A partir des bases de données mises à disposition par le SIRE, l'IFCE, et la FFE, chaque cheval est classé selon l'un des cinq motifs d'absence d'indice suivants :

- « FEI » : Vente et participation à des compétitions d'endurance de niveau international à l'étranger mais dont les résultats ne sont pas répertoriés pour un calcul d'IRE français ;
- « Autre discipline » : Carrière détournée vers une autre discipline équestre et dans laquelle un indice est disponible ;
- « Loisir » : Trop faible nombre ou trop petit niveau de compétitions en France pour qu'un indice représentatif soit publié (indice inexistant ou trop peu précis $CD < 0,6$) ;
- « Reproduction » : Carrière consacrée à la reproduction, avec deux descendants ou plus ;
- « Décès » : Décès survenu entre la collecte des données morphologiques et l'année 2019.

C. Traitement des données et analyse des résultats

L'ensemble des données est saisi dans un tableur Excel, et les analyses statistiques sont réalisées avec le logiciel SAS Studio®.

D'abord, nous décrivons les variables morphologiques et morphométriques de notre échantillon d'étude, ainsi que les variables de performance utilisées pour l'analyse.

Ensuite, nous nous intéressons au lien entre la morphologie et la performance à long terme des jeunes chevaux de l'étude. Elle est quantifiée par les indices IRE 2019 définis par l'INRAE, disponibles pour 327 chevaux des 489 de l'étude. L'association entre la morphologie du jeune cheval et les variables quantitatives de performance à long terme, d'abord, est évaluée avec des corrélations de Pearson ou de Spearman, selon que la distribution des variables suit une loi normale ou non. Puis l'association entre la morphologie et une vision qualitative de la performance en trois catégories de niveau de performance est étudiée par des analyses de variances.

Enfin, nous nous penchons sur la relation entre la morphologie et deux aspects binaires de la performance à long terme : la longévité de carrière, puis la participation à des compétitions de haut niveau, par des tests de Student ou Mann-Whitney Wilcoxon.

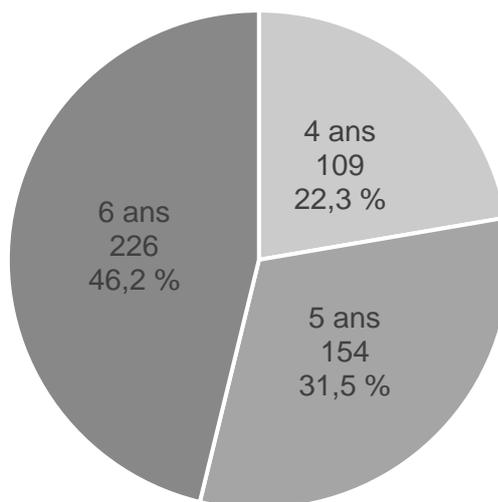
3. Résultats

A. Caractéristiques des chevaux de l'étude

a. Âge

Les 489 chevaux de l'étude sont âgés de 4 à 6 ans au moment de leur évaluation morphométrique, avec 109 chevaux âgés de 4 ans (22,3 %), 154 chevaux âgés de 5 ans (31,5 %), et 226 chevaux de 6 ans (46,2 %), comme illustré sur la figure suivante.

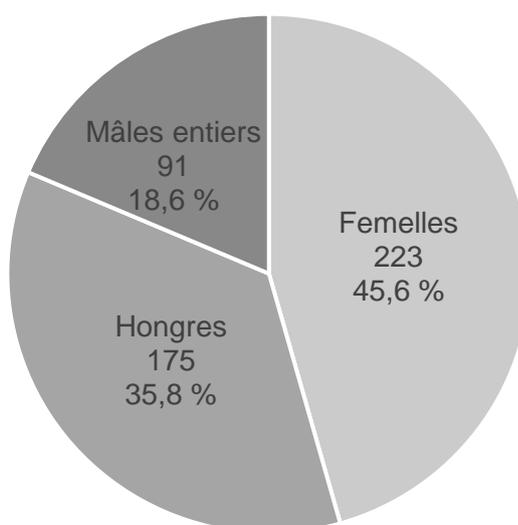
Figure 16 : Répartition des chevaux de l'étude selon leur âge lors des mesures



b. Sexe

Concernant leur sexe à l'âge de la prise de mesure, les 489 chevaux de l'étude se répartissent comme suit : 223 femelles (45,6 %), 175 hongres (35,8 %) et 91 mâles entiers (18,6 %). La figure suivante illustre cette répartition par sexe.

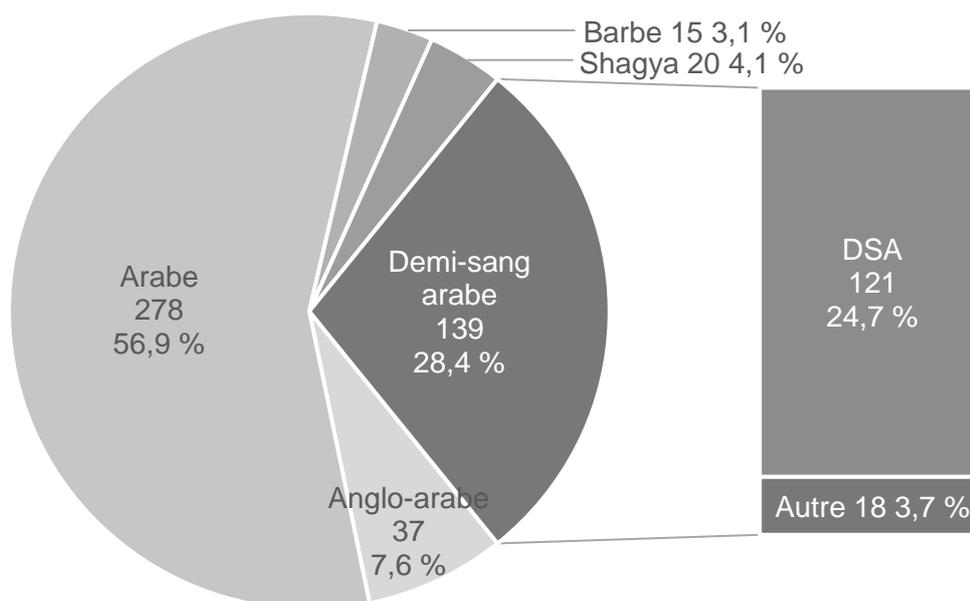
Figure 17 : Répartition des chevaux de l'étude selon leur sexe



c. Race

Tous les chevaux inclus dans l'étude ont au moins un ascendant de race Arabe et se répartissent par race dans les proportions suivantes : 278 chevaux de race Arabe (56,9 %), 37 chevaux Anglo-arabe (7,6 %), 20 Shagya (4,1 %), 15 Barbe (3,1 %) et 121 Demi-sang arabe. Les 18 chevaux d'autres races (Selle Français, Cheval de Selle, Barbe arabe, Barbe, Poney Français de Selle, Poney, et Origine Constatée) sont inclus dans le groupe des Demi-sang arabes qui représentent alors 28,4 % de l'échantillon entier. La figure suivante illustre la part des différentes races dans l'échantillon étudié.

Figure 18 : Répartition des races des chevaux de l'échantillon



B. Etude descriptive des données morphologiques et morphométriques

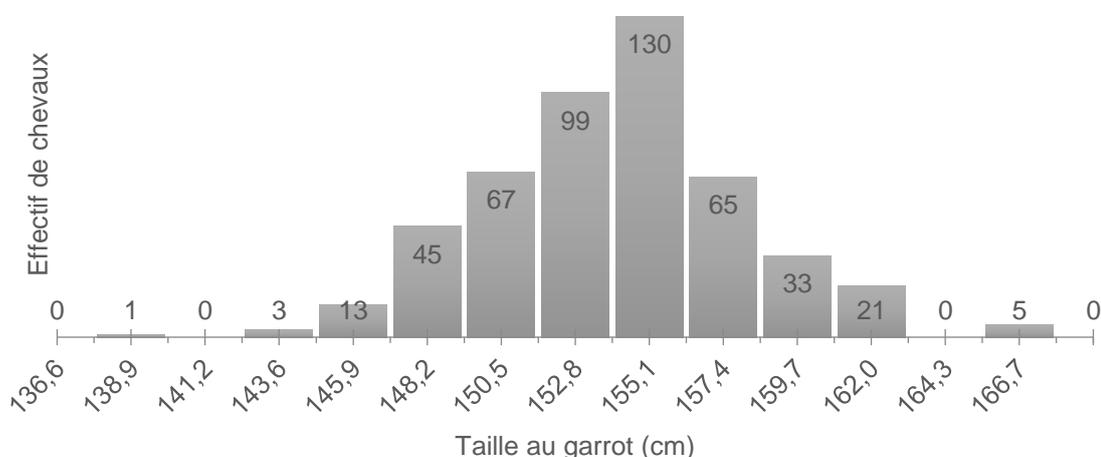
a. Mensurations

Certaines mensurations n'ont pas été obtenues sur l'ensemble de l'échantillon étudié en raison du caractère non coopératif de quelques chevaux concernant les manipulations telles que la montée sur la balance, la pose de la toise, ou encore la mesure du périmètre thoracique au ruban.

- *Hauteur au garrot (HG)*

La hauteur au garrot a été mesurée pour 482 des 489 chevaux de l'étude. Elle est exprimée en mètres. La moyenne des mesures est de 1,53 m (écart-type SD = 0,04), avec des valeurs extrêmes de 1,38 m et 1,65 m. La figure suivante illustre la répartition des mesures de hauteur au garrot dans l'échantillon étudié, que l'on peut considérer comme suivant une loi normale.

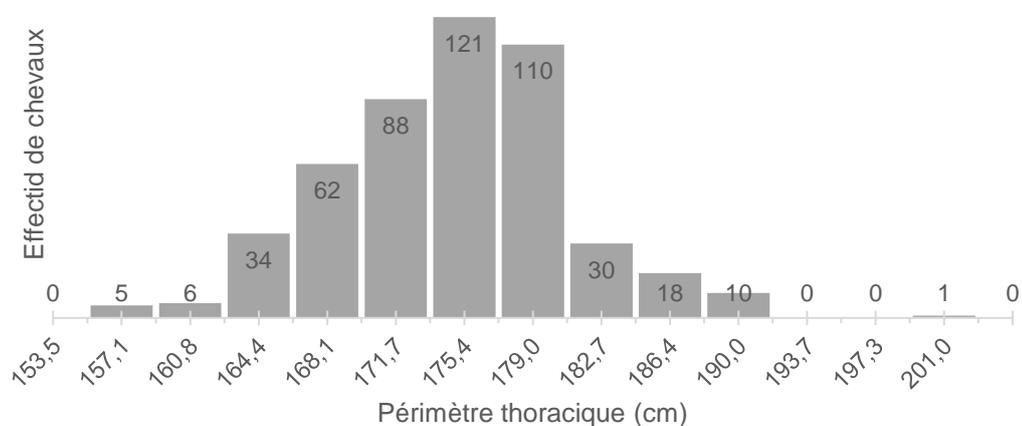
Figure 19 : Distribution des 482 chevaux en fonction de leur taille au garrot



- *Périmètre thoracique (PT)*

Le périmètre thoracique a été évalué pour 485 des 489 chevaux étudiés. Il est exprimé en mètres. La moyenne des mesures est de 1,73 m (SD = 0,06), et varie entre des valeurs extrêmes de 1,55 m à 1,99 m. La figure suivante illustre la répartition des mesures de périmètre thoracique dans l'échantillon étudié, que l'on peut considérer comme suivant une loi normale.

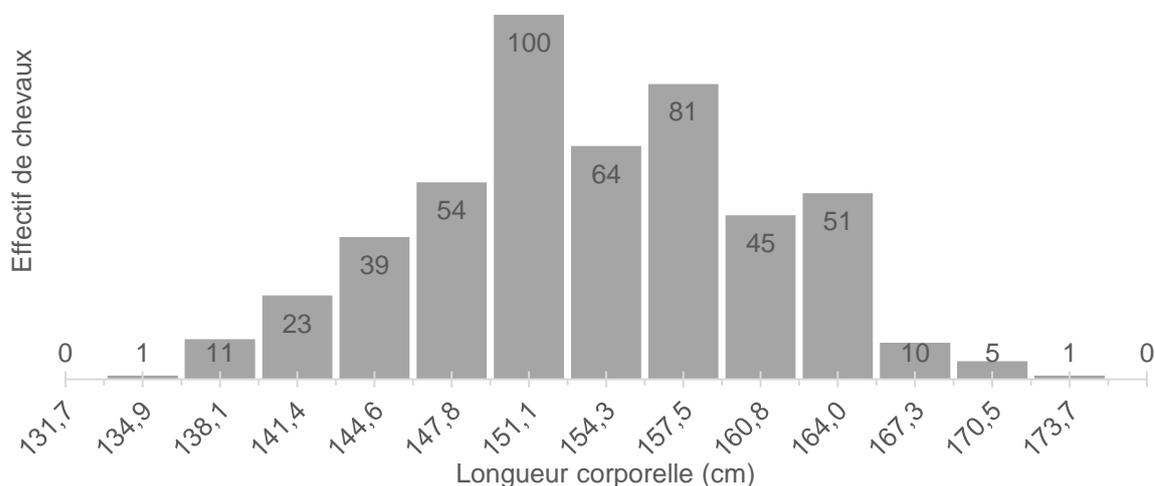
Figure 20 : Distribution des 485 chevaux en fonction de leur périmètre thoracique



- *Longueur corporelle (LC)*

La longueur corporelle a été mesurée sur 485 des 489 chevaux. Elle est exprimée en centimètres. La moyenne des mesures est de 152 cm (SD = 7), et varie entre des valeurs extrêmes de 133 cm à 172 cm. La figure suivante illustre la répartition des mesures de longueur corporelle dans l'échantillon étudié, que l'on peut considérer comme suivant une loi normale.

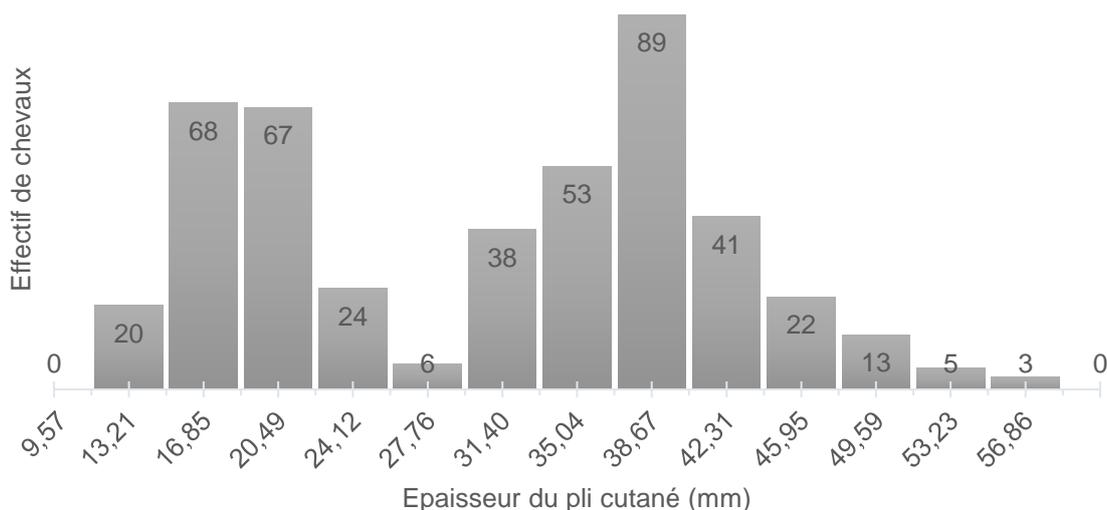
Figure 21 : Distribution des 485 chevaux en fonction de leur longueur corporelle



- *Pli cutané (PC)*

L'épaisseur du pli cutané est mesurée sur 449 chevaux. Elle est exprimée en millimètres (mm). La moyenne des mesures est de 29,07 mm (SD = 10,94), et varie entre des valeurs extrêmes de 9,67 mm à 56,30 mm. La figure suivante illustre la répartition des mesures d'épaisseur de pli cutané au sein de l'échantillon étudié, que l'on ne peut pas considérer comme suivant une loi normale.

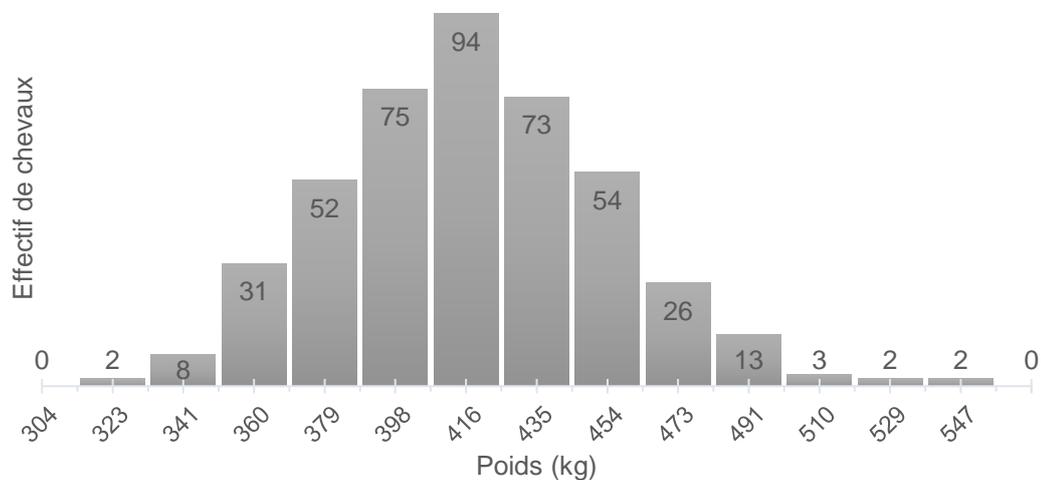
Figure 22 : Distribution des 449 chevaux en fonction de l'épaisseur de leur pli cutané



b. Poids

Le poids en kilogrammes a été mesuré sur 436 chevaux de l'échantillon étudié. Il varie entre 307 kg et 542 kg avec une moyenne de 408 kg (SD = 37). La figure suivante illustre la répartition des mesures de poids dans l'échantillon étudié, que l'on peut considérer comme suivant une loi normale.

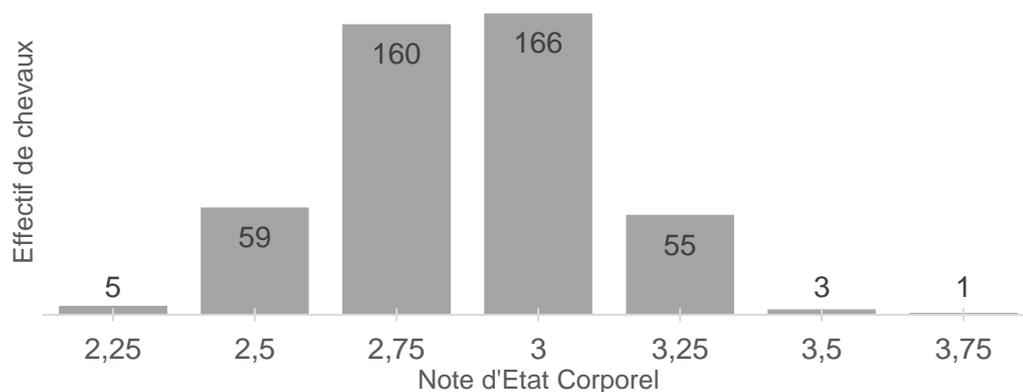
Figure 23 : Distribution des 436 chevaux pesés en fonction de leur poids



c. Note d'état corporel

La note d'état corporel a été évaluée sur 450 chevaux. La moyenne est de 2,87 (SD = 0,24) et les valeurs s'étendent entre un minimum de 2,25 et un maximum de 3,75. La figure suivante illustre la répartition des mesures de NEC dans l'échantillon étudié, que l'on peut considérer comme suivant une loi normale.

Figure 24 : Répartition des notes d'état corporel attribuées aux chevaux de l'étude



d. Mesures photométriques

Les mesures photométriques manquent chez une partie des chevaux observés en 2011, 2012 et 2013, et sont absentes chez tous les chevaux de la session d'étude de 2014. Ainsi, tout ou partie des données morphométriques ont été recueillies chez 447 des 498 chevaux inclus dans l'étude.

La distribution de chacune des variables est vérifiée et, pour celles dont on peut douter que la répartition suive une loi normale, on considère qu'elle n'en suit pas. Ces variables sont soulignées dans le tableau suivant qui présente, pour chaque variable morphométrique, les valeurs minimale et maximale, et la moyenne accompagnée de son écart-type ou la médiane accompagnée de son interquartile, obtenues sur l'échantillon entier.

Tableau 10 : Valeurs minimale, maximale, moyenne et écart-type ou médiane et interquartile de chaque variable morphométrique mesurée de taille, ligne du dessus et ligne du dos

VARIABLE	Unité	Valeur minimale	Moyenne ± SD	Médiane (Q1 ; Q3)	Valeur maximale
TAILLE					
TAILLEC	m	1,37	1,51 ± 0,06		1,71
VIDESST	m	0,72	0,85 ± 0,03		0,93
THORAX	m	0,60	0,68 ± 0,03		0,76
LIGNE DU DESSUS					
TETE	m	0,36	0,49 ± 0,04		0,61
ENCOLURE	m	0,55	0,74 ± 0,07		0,94
LONGUEUR	m	1,21	1,38 ± 0,06		1,57
LONGUEURtot	m	1,38	1,54 ± 0,06		1,73
<u>IEPAULEPOINTEHANCHE</u>	degrés	-12		- 6 (- 5 ; - 7)	+2
<u>ICOUDEGRASSET</u>	degrés	-10		- 5 (- 4 ; - 6)	+2
DOS					
DOSAV	m	0,15	0,28 ± 0,04		0,43
DOSARR	m	0,40	0,54 ± 0,04		0,66
ADOS	degrés	138	152,33 ± 3,60		161
HGARROT	m	0,05	0,10 ± 0,02		0,17
IGARROT	degrés	11	19,61 ± 3,39		31

Les variables soulignées sont celles dont on ne considère pas la distribution comme suivant une loi normale dans notre échantillon

SD = Standard Deviation ou Ecart-type ; Q1 = 1^{er} Quartile ; Q3 = 3^e Quartile

Tableau 11 : Suite du tableau 4 des valeurs minimale, maximale, moyenne et écart-type ou médiane et interquartile des variables morphométriques mesurées sur les antérieurs et les postérieurs

VARIABLE	Unité	Valeur minimale	Moyenne ± SD	Médiane (Q1 ; Q3)	Valeur maximale
ANTERIEURS					
Segments					
SCAPULA	m	0,38	0,50 ± 0,03		0,59
HUMERUS	m	0,23	0,29 ± 0,02		0,36
RADIUS	m	0,31	0,40 ± 0,03		0,49
<u>METACARPE</u>	m	0,22		0,30 (0,28 ; 0,33)	0,41
PHALANGEA	m	0,16	0,20 ± 0,02		0,25
Angles et inclinaisons					
IEPAULE	degrés	43	57,70 ± 4,21		75
<u>IHUMERUS</u>	degrés	31		43 (40 ; 46)	59
AEPAULE	degrés	86	100,69 ± 4,42		116
ACOUDE	degrés	115	133,84 ± 6,05		153
AGENOU	degrés	173	179,59 ± 1,81		185
POSTERIEURS					
Segments					
COXAE	m	0,25	0,36 ± 0,03		0,45
SACRE	m	0,24	0,32 ± 0,03		0,39
FEMUR	m	0,33	0,43 ± 0,03		0,52
TIBIA	m	0,30	0,47 ± 0,05		0,60
METATARSE	m	0,32	0,40 ± 0,03		0,52
PHALANGEP	m	0,15	0,20 ± 0,02		0,28
Angles et inclinaisons					
IBASSIN	degrés	5	19,71 ± 5,01		36
IFEMUR	degrés	46	59,20 ± 4,67		77
AHANCHE	degrés	63	78,91 ± 6,35		95
AGRASSET	degrés	86	116,71 ± 6,61		150
AJARRET	degrés	116	145,94 ± 4,73		160

Les variables soulignées sont celles dont on ne considère pas la distribution comme suivant une loi normale dans notre échantillon

SD = Standard Deviation ou Ecart-type ; Q1 = 1^{er} Quartile ; Q3 = 3^e Quartile

e. Rapports, surfaces, et indices calculés

De la même manière que les variables morphométriques mesurées précédemment décrites, les valeurs minimale, maximale, moyenne et écart-type sont présentées dans le tableau suivant. Les variables soulignées sont celles dont on ne peut pas considérer que la distribution suit une loi normale.

Tableau 12 : Valeurs minimale, maximale, moyenne et écart-type ou médiane et interquartile de chaque variable morphométrique calculée

VARIABLE	Unité	Valeur minimale	Moyenne ± SD	Médiane (Q1 ; Q3)	Valeur maximale
INDICES CORPORELS (IC)					
<u>ICPROFIL</u>	sans unité	0,90		1,01 (0,98 ; 1,03)	1,17
<u>ICCOMPACITE</u>	sans unité	0,30		0,37 (0,36 ; 0,40)	0,47
ICRELATIF	m / kg	0,92	1,14 ± 0,05		1,29
SURFACES (S)					
SHODGSON	m ²	1,09	4,35 ± 0,34		5,43
SBRODY	cm ²	3,25	3,90 ± 0,23		4,67
INDICES SURFACIQUES (IS)					
ISHODGSON	kg / m ²	86,58	93,58 ± 2,13		99,89
ISBRODY	kg / m ²	94,49	104,60 ± 3,43		115,94
RAPPORTS					
HG/TAILLEC	sans unité	0,91	1,01 ± 0,03		1,09
Membre antérieur					
RADIUS/METACARPE	sans unité	0,91	1,33 ± 0,20		2,05
RADIUS/HG	sans unité	0,21	0,26 ± 0,02		0,31
THORAX/HG	sans unité	0,41	0,44 ± 0,01		0,50
Triangle postérieur					
<u>GRASSETPTEHANCHE</u>	m	0,11		0,59 (0,44 ; 0,74)	0,91
COXAE/FEMUR	sans unité	0,63	0,84 ± 0,07		1,05
<u>COXAE/GRASSETPTEHANCHE</u>	sans unité	0,41		0,60 (0,48 ; 0,76)	3,25
<u>FEMUR/GRASSETPTEHANCHE</u>	sans unité	0,50		0,72 (0,58 ; 0,91)	4,15

Les variables soulignées sont celles dont on ne considère pas la distribution comme suivant une loi normale dans notre échantillon

SD = Standard Deviation ou Ecart-type ; Q1 = 1^{er} Quartile ; Q3 = 3^e Quartile

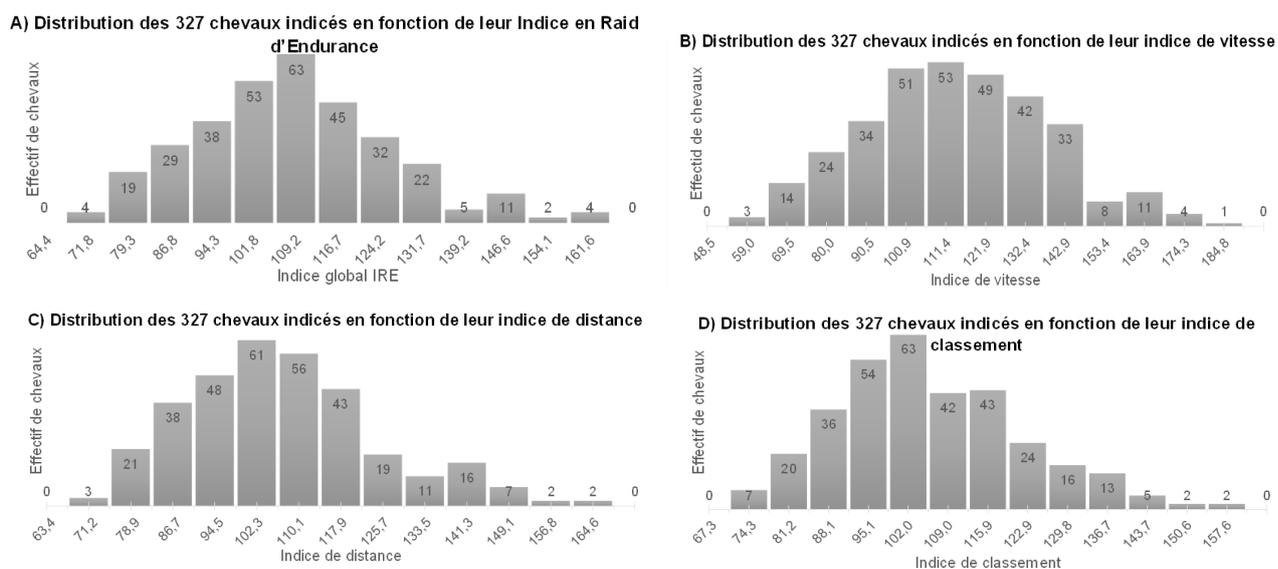
f. Performance et contre-performance

Afin de caractériser la performance à long terme des chevaux d'endurance, nous disposons des variables quantitatives et qualitatives décrites ci-dessous.

- **Indices de performance : approche quantitative de la performance en endurance**

Parmi les 489 chevaux inclus dans l'étude, nous disposons des indices de performance 2019 pour 53 des 109 chevaux de 4 ans (48,6 %), 100 des 154 chevaux de 5 ans (64,9 %), et 174 des 226 chevaux de 6 ans (77,0 %). La distribution des quatre indices de performance dans l'échantillon total suit une loi normale, comme l'illustre la figure suivante.

Figure 25 : Distribution des quatre indices de performances dans l'échantillon étudié



Ainsi, les valeurs minimale, maximale, moyenne et écart-type, de chacun des quatre indices de performance dans notre échantillon de chevaux indicés sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 13 : Valeurs minimale, maximale, moyenne et écart-type des indices de performance dans l'échantillon d'étude

Variables de performance par classe d'âge	Valeur minimale	Valeur moyenne \pm SD	Valeur maximale
IRE	65	105 \pm 18	160
Indice de Vitesse	49	109 \pm 24	183
Indice de Classement	68	102 \pm 16	156
Indice de Distance	64	103 \pm 18	163

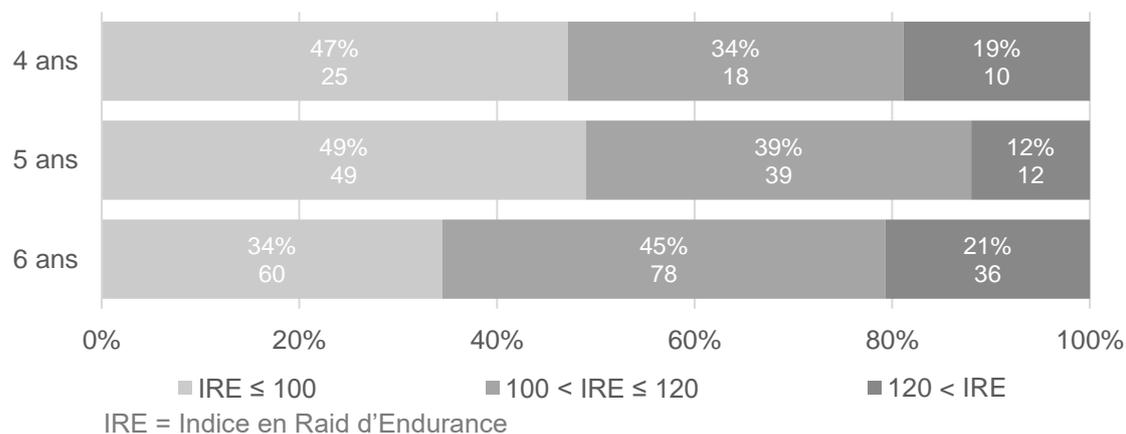
IRE = Indice en Raid d'Endurance ; SD = Standard Deviation ou Ecart-type

Les chevaux de notre étude ont des indices de performance légèrement au-dessus du cheval moyen, caractérisé par un IRE de 100 (Sabbagh *et al.*, 2017).

- *Catégories de performance : approche qualitative de la performance en endurance*

A partir des indices IRE disponibles, nous pouvons classer les chevaux de l'étude par catégorie de performance. Pour chaque âge à la prise des mesures morphométriques, on distingue donc trois groupes de chevaux selon la valeur de leur IRE par rapport aux valeurs seuil de 100 et 120. La figure ci-dessous présente les effectifs et proportions obtenus.

Figure 26 : Distribution (pourcentages et effectifs) des chevaux indicés selon leur catégorie de performance, par classe d'âge



- *Longévité de carrière : approche qualitative binaire de la performance en endurance*

- Age à la dernière course enregistrée en 2019 :

Parmi les 327 chevaux de l'étude indicés, l'âge à la dernière course (AGE_LAST_PERF) est calculé à partir de l'année de dernière compétition enregistrée par l'IFCE (variable MAX_AN_PERF) à laquelle est soustraite l'année de naissance. Or, la distribution de l'âge à la dernière course enregistrée lors de l'indexation des performances en 2019 ne suit pas une loi normale. Les valeurs minimale, maximale, médiane et interquartiles de l'âge à la dernière course sont présentés, par classes d'âges, dans le tableau suivant.

Tableau 14 : Valeurs minimale, maximale, médiane et intervalle interquartile de l'âge de fin de carrière par classe d'âge à la prise des mesures

Longévité de carrière (AGE_LAST_PERF) par classe d'âge	Valeur minimale	Médiane (Q1 ; Q3)	Valeur maximale
Chevaux de 4 ans (n = 53)	6	8 (7 ; 10)	12
Chevaux de 5 ans (n = 100)	6	9 (8 ; 11)	13
Chevaux de 6 ans (n = 174)	6	9 (8 ; 11)	14

Q1 = 1^{er} Quartile ; Q3 = 3^e Quartile

Dans chaque classe d'âge, il existe des chevaux dont la carrière en endurance s'est arrêtée dès l'âge de 6 ans, à la fin des circuits Jeunes Chevaux ; et d'autres dont la participation en course d'endurance est encore active à plus de 12 ans d'âge.

- Variable binaire de durée de carrière :

Tous les chevaux de l'échantillon dont l'année de dernière performance est 2019 (et qui ont potentiellement continué à performer dans la discipline pendant les années suivantes) sont des chevaux âgés de dix ans ou plus en 2019. Ainsi, pour s'affranchir de l'âge des chevaux selon l'année de la session de prise de mesure, on définit une variable binaire classant les chevaux selon une carrière en endurance courte ou longue par rapport à la valeur seuil de dix ans. Les effectifs et pourcentages obtenus, par classe d'âge, concernant les chevaux dont la carrière en endurance est strictement inférieure à dix ans d'une part, ou supérieure ou égale à dix ans d'autre part, sont représentés dans le tableau 15.

Tableau 15 : Effectifs et pourcentages associés des chevaux avec indices, selon leur âge et leur durée de carrière

Classe d'âge	Chevaux avec indices par durée de carrière			
	< 10 ans		≥ 10 ans	
Chevaux de 4 ans (n = 53)	35	66 %	18	34 %
Chevaux de 5 ans (n = 100)	56	56 %	44	44 %
Chevaux de 6 ans (n = 174)	90	52 %	84	48 %
<i>Total (n = 327)</i>	<i>181</i>	<i>55 %</i>	<i>146</i>	<i>45 %</i>

n = effectif

- *Atteinte du haut niveau : approche qualitative binaire de la performance en endurance*

- Motif d'absence d'indice de performance :

Pour chacun des 162 chevaux non indicés, l'un des cinq motifs d'absence d'indice est attribué. Les effectifs et pourcentages, parmi les chevaux non indicés, par classe d'âge, sont répertoriés dans le tableau suivant.

Tableau 16 : Effectifs et pourcentages associés des différents motifs d'absence d'indice de performance 2019, parmi les chevaux sans indice, par classe d'âge

Chevaux sans indice par classe d'âge	FEI	Autre discipline	Loisir	Mise à la reproduction	Décès
Chevaux de 4 ans (n = 56)	12 21,4 %	12 21,4%	24 42,9 %	6 10,7 %	2 3,6 %
Chevaux de 5 ans (n = 54)	14 26 %	6 11,1 %	20 37 %	12 22,2 %	2 3,7 %
Chevaux de 6 ans (n = 52)	15 28,8 %	5 9,6 %	26 48,1 %	5 9,6 %	1 1,9 %
<i>Total (n = 162)</i>	<i>41 25,3 %</i>	<i>23 14,2 %</i>	<i>70 43,2 %</i>	<i>23 14,2 %</i>	<i>5 3,1 %</i>

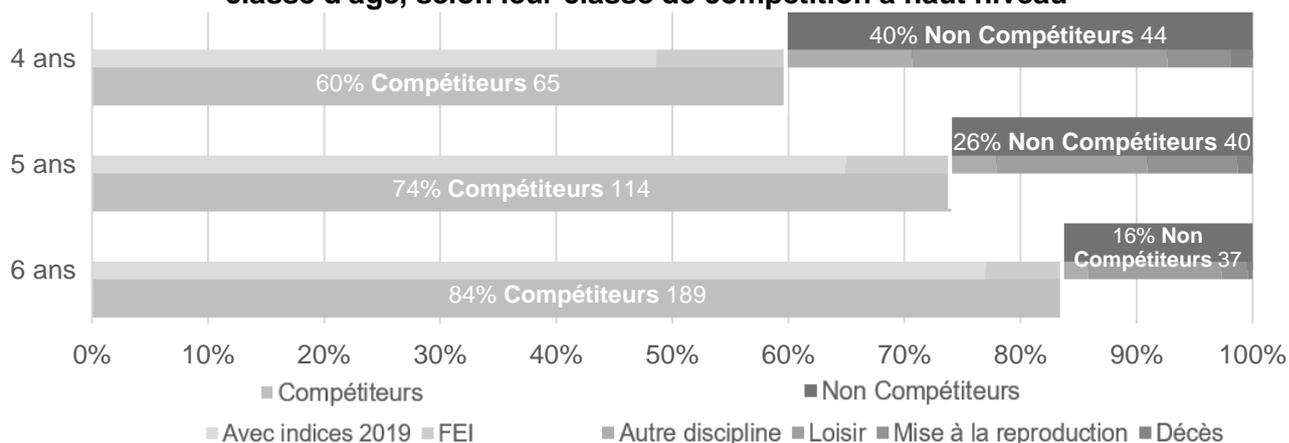
FEI = chevaux concourant en compétition de la Fédération Equestre Internationale ; n = effectif

Les effectifs pour chaque motif d'absence d'indices sont très faibles en comparaison aux effectifs de chevaux indicés, respectivement de 186, 114 et 68 pour les 4, 5 et 6 ans.

- Classement par compétiteurs ou non à haut niveau :

Les chevaux attribués à la catégorie « FEI » sont des chevaux vendus à l'étranger après leur inclusion dans l'étude et ne sont pas indicés en France, mais qui concourent tout de même au niveau international en endurance. Ainsi, on les regroupe avec les chevaux indicés pour constituer un classe de chevaux « compétiteurs » en endurance à haut niveau, que l'on distingue de la classe des chevaux « non compétiteurs » formée par les quatres autres motifs (Décès, Mise à la reproduction, Loisir, Autre discipline). Les effectifs obtenus par classe d'âge sont présentés dans la figure suivante.

Figure 27 : Représentation des pourcentages et effectifs de chevaux, pour chaque classe d'âge, selon leur classe de compétition à haut niveau



FEI = chevaux concourant en compétition de la Fédération Equestre Internationale

C. Etude analytique : relations entre les paramètres morphologiques et la performance

a. Relation entre la morphologie et les indices de performance en endurance

Les tests statistiques utilisés pour d'écrire la relation entre les variables morphologiques d'une part, et les indices de performance qui suivent une loi normale d'autre part, sont :

- Le test de corrélation de Pearson pour les variables quantitatives de hauteur au garrot (HG), périmètre thoracique (PT), longueur corporelle (LC), poids, et NEC ; dont on considère la distribution comme suivant une loi normale ;
- Le test de corrélation de Spearman pour la variable quantitative d'épaisseur de pli cutané (PC), qui ne suit pas une loi normale.

Les résultats dont l'association est statistiquement significative avec un alpha à 0,05 sont surlignés en gras dans les tableaux qui suivent. L'ensemble des coefficients de corrélations et p-value obtenus pour chaque test de Pearson ou Spearman sont consultables en annexe 2, pour chaque classe d'âge.

- Paramètres de mensuration

- Chevaux de 4 ans

Tableau 17 : Résultats des tests statistiques de corrélation de Pearson ou Spearman entre les variables morphologiques chez les chevaux de 4 ans et leurs indices de performances

Variable morphologique dans l'effectif de chevaux de 4 ans	IRE		Vitesse		Classement		Distance	
	r	p	r	p	r	p	r	p
HG (n = 52)	0,22	0,12	0,11	0,42	0,28	0,043	0,25	0,08
PT (n = 53)	- 0,08	0,58	- 0,10	0,47	- 0,01	0,93	0,05	0,70
LC (n = 53)	0,11	0,43	0,08	0,56	0,14	0,30	0,10	0,47
Poids (n = 50)	0,14	0,33	0,10	0,50	0,19	0,20	0,13	0,36
NEC (n = 51)	0,06	0,66	0,04	0,80	0,08	0,56	0,06	0,68
<u>PC</u> (n = 53)	- 0,06	0,72	- 0,10	0,48	- 0,01	0,94	0,05	0,72

IRE = Indice en Raid d'Endurance ; r = coefficient de corrélation ; p = p-value ; n = effectif ;

HG = Hauteur au Garrot ; PT = Périmètre Thoracique ; LC = Longueur Corporelle ; NEC = Note d'Etat Corporel ;

PC = Pli Cutané (variable soulignée car n'est pas considérée comme suivant une loi normale et le test de Spearman lui a été appliqué)

Chez les chevaux de 4 ans, la **hauteur au garrot** est corrélée positivement à l'indice de classement ($r = 0,28$; $p < 0,05$) : les chevaux plus grands à 4 ans ont en moyenne un meilleur indice de classement sur leur carrière.

Les autres paramètres morphologiques ne présentent pas de corrélation significative avec les paramètres de performance de carrière dans notre échantillon de chevaux de 4 ans.

□ Chevaux de 5 ans

Tableau 18 : Résultats des tests statistiques de corrélation de Pearson ou Spearman entre les variables morphologiques chez les chevaux de 5 ans et leurs indices de performance

Variable morphologique dans l'effectif de chevaux de 5 ans	IRE		Vitesse		Classement		Distance	
	r	p	r	p	r	p	r	p
HG (n = 99)	0,14	0,18	0,10	0,33	0,14	0,16	0,14	0,16
PT (n = 100)	0,14	0,15	0,05	0,56	0,16	0,11	0,20	0,048
LC (n = 100)	0,16	0,12	0,12	0,22	0,15	0,13	0,16	0,12
Poids (n = 96)	0,19	0,06	0,14	0,17	0,19	0,07	0,21	0,046
NEC (n = 97)	0,14	0,16	0,11	0,27	0,15	0,14	0,12	0,23
<u>PC</u> (n = 99)	0,09	0,35	0,12	0,22	0,06	0,53	0,03	0,73

IRE = Indice en Raid d'Endurance ; r = coefficient de corrélation ; p = p-value ; n = effectif ; HG = Hauteur au Garrot ; PT = Périmètre Thoracique ; LC = Longueur Corporelle ; NEC = Note d'Etat Corporel ; PC = Pli Cutané (variable soulignée car n'est pas considérée comme suivant une loi normale et le test de Spearman lui a été appliquée)

Parmi les chevaux de 5 ans, le **périmètre thoracique** (r = 0,20 ; p < 0,05) et le **poids** (r=0,21 ; p < 0,05) sont positivement corrélés à l'indice distance : les chevaux ayant un périmètre thoracique plus important d'une part, et plus lourds d'autre part, ont un meilleur indice distance de carrière.

Aucun autre paramètre morphologique ne présente de corrélation significative avec les indices de performance dans notre échantillon de chevaux de 5 ans.

□ Chevaux de 6 ans

Tableau 19 : Résultats des tests statistiques de corrélation de Pearson ou Spearman entre les variables morphologiques chez les chevaux de 6 ans et leurs indices de performance

Variable morphologique dans l'effectif de chevaux de 6 ans	IRE		Vitesse		Classement		Distance	
	r	p	r	p	r	p	r	p
HG (n = 171)	0,18	0,02	0,21	0,005	0,12	0,11	0,13	0,08
PT (n = 173)	0,09	0,25	0,12	0,12	0,04	0,58	0,06	0,44
LC (n = 173)	0,11	0,15	0,13	0,09	0,08	0,29	0,08	0,30
Poids (n = 146)	0,14	0,10	0,17	0,04	0,11	0,19	0,08	0,31
NEC (n = 148)	0,07	0,38	0,02	0,78	0,10	0,21	0,12	0,14
<u>PC</u> (n = 148)	- 0,01	0,88	- 0,04	0,67	- 0,007	0,94	- 0,001	0,99

IRE = Indice en Raid d'Endurance ; r = coefficient de corrélation ; p = p-value ; n = effectif ; HG = Hauteur au Garrot ; PT = Périmètre Thoracique ; LC = Longueur Corporelle ; NEC = Note d'Etat Corporel ; PC = Pli Cutané (variable soulignée car n'est pas considérée comme suivant une loi normale et le test de Spearman lui a été appliquée)

Dans notre échantillon de chevaux de 6 ans, la **hauteur au garrot** est positivement corrélée à l'indice global de carrière (r = 0,18 ; p < 0,05) et à l'indice de vitesse (r = 0,21 ; p < 0,01) : les chevaux de 6 ans les plus grands ont un indice vitesse plus élevé et un meilleur indice global de carrière en endurance. Le **poids** est aussi positivement corrélé à l'indice de vitesse (r = 0,17 ; p < 0,05) : les chevaux avec de meilleurs indices de vitesse de carrière sont plus lourds à 6 ans.

Les autres paramètres morphologiques ne présentent pas de corrélation significative avec les paramètres de performance de carrière dans notre échantillon de chevaux de 6 ans.

- *Variables morphométriques mesurées*

Les variables morphométriques présentant une corrélation significative avec un ou plusieurs indices de performance sont résumées dans le tableau suivant.

Tableau 20 : Résultats significatifs des corrélations de Pearson entre les variables morphométriques mesurées et les indices de performance, par classe d'âge

Variable morphométrique	IRE		Vitesse		Classement		Distance	
	r	p	r	p	r	p	r	p
Chevaux de 4 ans (n = 51)								
ENCOLURE	0,26	0,07	0,11	0,46	0,34	0,014	0,34	0,015
Chevaux de 5 ans (n = 97)								
DOSARR	0,18	0,09	0,09	0,38	0,19	0,06	0,21	0,039
Chevaux de 6 ans (n = 149)								
TAILLEC	0,19	0,02	0,16	0,045	0,15	0,08	0,20	0,017
THORAX	0,21	0,01	0,21	0,01	0,16	0,045	0,19	0,02
DOSARR	0,16	0,06	0,14	0,10	0,17	0,04	0,14	0,09
ADOS	0,14	0,08	0,09	0,26	0,129	0,12	0,18	0,03
AGENOUE	-0,16	0,047	-0,14	0,08	-0,14	0,08	-0,15	0,06
PHALANGEP	0,28	0,0006	0,28	0,0005	0,22	0,008	0,24	0,003

IRE = Indice en Raid d'Endurance ; r = coefficient de corrélation ; p = p-value ; n = effectif

□ Chevaux de 4 ans

Chez les chevaux de 4 ans, seule la longueur de l'**encolure** présente une corrélation positive avec les indices de classement ($r = 0,34$; $p < 0,05$) et de distance ($r = 0,34$; $p < 0,05$) : ceux présentant une plus longue encolure dans notre échantillon ont de meilleurs indices de carrière de classement et de distance.

Aucune autre corrélation n'est mise en évidence entre les paramètres morphométriques à l'âge de 4 ans et les indices de performance à long terme dans notre échantillon.

□ Chevaux de 5 ans

Chez les chevaux de 5 ans, seule la **longueur entre le creux du dos et la pointe de la croupe** est positivement corrélée à l'indice distance ($r = 0,21$; $p < 0,05$) : les chevaux avec une croupe plus longue ont de meilleurs indices distance de carrière dans notre échantillon.

Aucune autre corrélation n'est mise en évidence entre les paramètres morphométriques à l'âge de 5 ans des chevaux de notre échantillon et les indices de performance à long terme.

□ Chevaux de 6 ans

Chez les chevaux de 6 ans de notre échantillon, la **hauteur à la croupe** et la **profondeur du thorax** sont positivement corrélées aux indices de vitesse (respectivement $r = 0,16$ et $r = 0,20$; $p < 0,05$), de distance (respectivement $r = 0,20$ et $r = 0,18$; $p < 0,05$), et à l'indice global IRE (respectivement $r = 0,19$ et $r = 0,20$; $p < 0,05$) : les chevaux avec les meilleurs indices de carrière,

excepté pour le classement, sont les plus hauts à la croupe avec un thorax plus profond, à l'âge de 6 ans.

La **longueur de la partie lombaire** est positivement corrélée à l'indice de classement ($r = 0,17$; $p < 0,05$) : les chevaux de 6 ans avec une distance entre le creux du dos et la croupe sont mieux classés au cours de leur carrière.

L'**angle du creux dos** est positivement corrélé à l'indice distance ($r = 0,18$; $p < 0,05$) : les chevaux avec un angle plus ouvert au niveau du creux du dos, c'est-à-dire avec un dos moins creusé, ont un meilleur indice distance de carrière.

Au niveau des antérieurs, l'**angle du carpe** est négativement corrélé à l'indice global de performance de carrière ($r = -0,16$; $p < 0,05$) : les chevaux avec un angle plus ouvert, soit les carpes les plus droits, ont de moins bonnes performances de carrière.

Sur les postérieurs, la longueur de la **phalange distale** est positivement corrélée à tous les indices de performance de carrière ($r = 0,28$, $r = 0,28$, $r = 0,22$ et $r = 0,24$, respectivement pour l'IRE, la vitesse, le classement et la distance ; $p < 0,01$) : les chevaux long-jointés au niveau des postérieurs ont de meilleurs indices de performance dans tous les aspects.

- *Surfaces, rapports, et indices calculés*

Les variables morphométriques calculées présentant une corrélation significative avec un ou plusieurs indices de performance sont résumées dans le tableau suivant.

Tableau 21 : Résultats significatifs des corrélations de Pearson entre les variables morphométriques calculées et les indices de performance, par classe d'âge

Variable morphométrique	IRE		Vitesse		Classement		Distance	
	r	p	r	p	r	p	r	p
Chevaux de 4 ans ($n = 51$)								
HG/TAILLEC	0,32	0,02	0,17	0,24	0,37	0,007	0,39	0,004
Chevaux de 5 ans ($n = 97$)								
S _{HODGSON}	0,19	0,06	0,14	0,17	0,19	0,07	0,20	0,047
S _{BRODY}	0,19	0,06	0,14	0,17	0,19	0,07	0,21	0,044
IS _{HODGSON}	0,20	0,06	0,14	0,18	0,19	0,07	0,21	0,041
IS _{BRODY}	0,19	0,06	0,14	0,18	0,19	0,07	0,21	0,043
Chevaux de 6 ans ($n = 149$)								
S _{HODGSON}	0,14	0,10	0,17	0,043	0,11	0,19	0,08	0,31
S _{BRODY}	0,14	0,10	0,17	0,043	0,11	0,19	0,08	0,31
IS _{HODGSON}	0,14	0,10	0,17	0,045	0,11	0,19	0,08	0,32
IS _{BRODY}	0,14	0,10	0,17	0,044	0,11	0,19	0,08	0,31

IRE = Indice en Raid d'Endurance ; r = coefficient de corrélation ; p = p-value ; n = effectif ; S = Surface ; IS = Indice Surfaccique

□ Chevaux de 4 ans

Parmi les chevaux de 4 ans, seul le **rapport de hauteur entre le garrot et la croupe** est positivement corrélé à l'indice global ($r = 0,32$, $p < 0,05$), de classement ($r = 0,37$, $p < 0,01$), et de distance ($r = 0,39$, $p < 0,01$). Les chevaux de 4 ans avec une croupe plus basse que le garrot ont de meilleurs indices de performance, excepté pour l'indice de vitesse.

Aucune association significative n'est mise en évidence entre les autres indices corporels et surfaciques, surfaces et rapports morphologiques avec les indices de performance de carrière chez les jeunes chevaux de 4 ans.

□ Chevaux de 5 ans

Chez les chevaux de 5 ans, les **surfaces et indices surfaciques** sont, selon les méthodes de calcul de Hodgson et Brody, positivement corrélés à l'indice de distance ($r = 0,20$ ou $0,21$; $p < 0,05$) : les chevaux avec une plus grande surface corporelle à 5 ans ont de meilleurs indices de distance au cours de leur carrière.

Aucune autre corrélation significative n'est mise en évidence entre la morphométrie calculée des chevaux de 5 ans et leurs indices à long terme.

□ Chevaux de 6 ans

Parmi les chevaux de 6 ans, les **surfaces et indices surfaciques** sont aussi, selon les deux méthodes de calcul, positivement corrélés à l'indice de vitesse ($r = 0,17$; $p < 0,05$) : les chevaux avec une plus grande surface corporelle à 6 ans ont de meilleurs indices de vitesse à long terme dans notre échantillon.

Aucune autre corrélation significative n'est mise en évidence entre la morphométrie calculée des chevaux de 6 ans et leurs indices à long terme.

b. Relation entre la morphologie et la catégorie de performance en endurance

Les tests statistiques utilisés pour d'écrire la relation entre les variables morphologiques d'une part, et les trois groupes de chevaux définis selon la valeur de leur IRE par rapport aux seuils de 100 et 120 d'autre part, sont :

- La modélisation linéaire généralisée GLM (Generalized Linear Model) pour les variables quantitatives dont on considère la distribution comme suivant une loi normale ;
- Le test de Kruskal-Wallis pour les variables quantitatives ne suivant pas une loi normale.

La méthode de Tukey est ensuite appliquée pour identifier les moyennes ou médianes significativement différentes.

Les résultats dont l'association est statistiquement significative avec un alpha à 0,05 sont surlignés en gras dans les tableaux qui suivent. L'ensemble des p-value obtenues pour les tests d'analyse de variance de chaque variable morphologique ou morphométrique entre les catégories d'IRE est accessible en annexe 3, pour chaque classe d'âge.

- *Paramètres de mensuration*

Les moyennes des paramètres morphologiques présentant une différence significative entre les catégories d'indice sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 22 : Moyennes des paramètres morphologiques présentant une différence significative entre les groupes de valeur d'IRE et par classe d'âge

Variable morphologique	p-value GLM	Moyenne des variables par classe d'indice		
		IRE ≤ 100	100 < IRE ≤ 120	120 < IRE
<i>Chevaux de 4 ans (n = 53)</i>		25	18	10
HG	0,01	151,8^a	151,4^a	155,8^b
<i>Chevaux de 5 ans (n = 100)</i>		49	39	12
Aucune différence significative entre les moyennes des variables morphologiques par classes				
<i>Chevaux de 6 ans (n = 174)</i>		60	78	36
HG	0,047	152,0^a	153,6^b	153,5 ^{a,b}

GLM = Generalized Linear Model ou modèle linéaire généralisé ;
IRE = Indice en Raid d'Endurance ; n = effectif ; HG = Hauteur au Garrot

□ Chevaux de 4 ans

Chez les chevaux de 4 ans, la **hauteur au garrot** est significativement plus grande ($p < 0,05$) chez les chevaux avec les meilleurs indices de performance par rapport aux chevaux avec un indice de performance inférieur à 120.

Les autres paramètres morphologiques ne présentent pas de différence significative entre les catégories d'IRE dans notre échantillon de chevaux de 4 ans.

□ Chevaux de 5 ans

Dans notre échantillon de chevaux de 5 ans, aucune différence significative entre les catégories d'IRE n'est mise en évidence concernant les paramètres morphologiques.

□ Chevaux de 6 ans

Parmi les chevaux de 6 ans, la **hauteur au garrot** est significativement plus petite ($p < 0,05$) chez les chevaux avec les indices de performance les plus faibles par rapport aux chevaux donc l'IRE est compris entre 100 et 120.

Aucun autre paramètre morphologique ne présente de différence significative selon la catégorie d'indice de performance dans notre échantillon de chevaux de 6 ans.

- Variables morphométriques mesurées

Les variables morphométriques présentant une différence significative entre les groupes de valeur d'IRE sont résumées dans le tableau suivant.

Tableau 23 : Moyennes des variables morphométriques présentant une différence significative entre les groupes de valeur d'IRE et par classe d'âge

Variable morphométrique		p-value GLM	Catégorie de performance		
			IRE ≤ 100	100 < IRE ≤ 120	120 < IRE
<i>Effectifs des chevaux de 4 ans (n = 53)</i>			25	18	10
TAILLE	VIDESST	0,002	0,85^a	0,84^a	0,88^b
ANTERIEURS	ACOUDE	0,043	131,3^a	135,3^b	132,1 ^{a,b}
<i>Effectifs des chevaux de 5 ans (n = 100)</i>			49	39	12
POSTERIEURS	TIBIA	0,007	0,49^a	0,46^b	0,48 ^{a,b}
<i>Effectifs des chevaux de 6 ans (n = 174)</i>			60	78	36
TAILLE	THORAX	0,02	0,67^a	0,68 ^{a,b}	0,68^b
ANTERIEURS	AGENOUE	0,045	180,3^a	179,9 ^{a,b}	179,2^b
POSTERIEURS	PHALANGEP	0,002	0,19^a	0,20 ^{a,b}	0,21^b

GLM = Generalized Linear Model ou modèle linéaire généralisé ; IRE = Indice en Raid d'Endurance ; n = effectif

□ Chevaux de 4 ans

Parmi les chevaux de 4 ans, ceux possédant les meilleurs indices de performance ont un **vide sous sternal** plus grand ($p < 0,05$) que les deux catégories de chevaux dont l'indice de performance est inférieur à 100 et entre 100 et 120. Les chevaux dont l'IRE est compris dans l'intervalle]100 ; 120] ont aussi un **angle du coude** plus ouvert ($p < 0,05$), dans notre échantillon de chevaux mesurés à l'âge de 4 ans, que ceux dont l'indice est à l'extérieur de cet intervalle.

Aucune autre différence significative entre les catégories de performance n'est mise en évidence concernant les paramètres morphométriques à l'âge de 4 ans dans notre échantillon.

□ Chevaux de 5 ans

Chez les chevaux de 5 ans, ceux dont l'indice est situé entre 100 et 120 présentent un **tibia** significativement plus court ($p < 0,05$) par rapport aux chevaux des catégories d'indices plus extrêmes.

Les autres variables morphométriques à 5 ans ne présentent pas de différence significative entre les catégories d'IRE dans notre échantillon.

□ Chevaux de 6 ans

Dans notre échantillon de chevaux de 6 ans, ceux dont l'indice est supérieur à 120 ont un **thorax** significativement plus profond ($p < 0,05$), un **angle du carpe** significativement moins ouvert ($p < 0,05$), et une **phalange postérieure** significativement plus longue ($p < 0,001$), que les chevaux dont l'IRE est inférieur à 100.

Aucune autre différence significative parmi les paramètres morphométriques à l'âge de 6 ans entre les catégories de performance n'est mise en évidence dans notre échantillon.

- *Surfaces, rapports, et indices calculés*

Les variables morphométriques calculées présentant une corrélation significative avec un ou plusieurs indices de performance sont résumées dans le tableau suivant.

Tableau 24 : Moyennes des variables morphométriques calculées présentant une différence significative entre les groupes de valeur d'IRE et par classe d'âge

Variable morphométrique calculée		p-value GLM	Performance des chevaux avec indices		
			IRE ≤ 100	100 < IRE ≤ 120	120 < IRE
<i>Effectifs des chevaux de 4 ans (n = 53)</i>			25	18	10
RAPPORTS	HG/TAILLEC	0,0002	1,01^a	1,01^a	1,04^b
<i>Effectifs des chevaux de 5 ans (n = 100)</i>			49	39	12
RAPPORTS	COXAE/FEMUR	0,02	0,84^a	0,80 ^{a,b}	0,82^b
<i>Effectifs des chevaux de 6 ans (n = 174)</i>			60	78	36
Aucune différence significative entre les médianes des variables morphométriques par durée de carrière					

GLM = Generalized Linear Model ou modèle linéaire généralisé ; IRE = Indice en Raid d'Endurance ; n = effectif

□ Chevaux de 4 ans

Parmi les chevaux de 4 ans de notre échantillon, seul le **rapport de hauteur entre le garrot et la croupe** est significativement différent (p-value < 0,001) entre les catégories d'IRE : les chevaux dont l'IRE est supérieur à 120 sont davantage « faits en descendant » avec le garrot plus haut que la croupe par rapport à ceux dont l'IRE est inférieur à 120.

Aucune autre différence significative de variable morphométrique calculée à 4 ans n'est mise en évidence entre les catégories d'IRE des chevaux de notre échantillon.

□ Chevaux de 5 ans

Parmi les chevaux de 5 ans de notre échantillon, le **rapport entre la longueur du bassin et la longueur du fémur** est significativement plus grand (p-value < 0,05) parmi les chevaux dont l'IRE est supérieur à 120 par rapport à ceux dont la valeur est inférieure à 100.

Aucune autre différence significative de variable morphométrique calculée à 4 ans n'est mise en évidence entre les catégories d'IRE des chevaux de notre échantillon.

□ Chevaux de 6 ans

Dans notre échantillon de chevaux de 6 ans, aucune différence significative de paramètre morphométrique calculé n'est mise en évidence entre les catégories d'IRE de carrière.

c. Relation entre la morphologie et la longévité en compétition

Nous étudions dans cette partie l'échantillon de chevaux indicés, classés par rapport à la durée de leur carrière. Les tests statistiques utilisés pour d'écrire la relation entre les variables morphologiques d'une part, et la variable binaire de durée de carrière par rapport à la valeur seuil de dix ans d'autre part, sont :

- Le test statistique de Student pour les variables quantitatives dont on considère la distribution comme suivant une loi normale ;
- Le test de Mann-Whitney Wilcoxon pour les variables quantitatives ne suivant pas une loi normale.

Les résultats dont l'association est statistiquement significative avec un alpha à 0,05 sont surlignés en gras dans les tableaux qui suivent. L'ensemble des p-value obtenues pour les tests d'analyse de variance de chaque variable morphologique ou morphométrique est accessible en annexe 4, pour chaque classe d'âge.

- *Mensurations*

Dans notre échantillon, aucune différence significative entre les variables morphologiques par rapport à la durée de carrière n'est mise en évidence entre les groupes de chevaux, quel que soit leur âge à la prise de mesure.

- *Variables morphométriques*

Les variables morphométriques dont la médiane chez le jeune cheval présente une différence significative entre les chevaux selon leur durée de carrière sont résumées dans le tableau suivant.

Tableau 25 : Moyennes des variables morphométriques significativement différentes selon le test de Student entre les groupes de durée de carrière parmi les chevaux indicés et classés par âge

Variable morphométrique		p-value	Durée de carrière des chevaux avec indices	
			< 10 ans	≥ 10 ans
<i>Effectifs des chevaux de 4 ans</i>			33	18
TAILLE	TAILLEC	0,0143	1,52^a	1,49^b
LIGNE DU DESSUS	LONGUEUR	0,0053	1,39^a	1,33^b
	LONGUEUR _{tot}	0,0289	1,55^a	1,51^b
POSTERIEURS	COXAE	0,0011	0,36^a	0,33^b
	TIBIA	0,0055	0,47^a	0,44^b
	PHALANGEP	0,0248	0,21^a	0,19^b
	IBASSIN	0,0007	19,1^a	24,7^b
	AHANCHE	0,0007	77,8^a	83,9^b
<i>Effectifs des chevaux de 5 ans</i>			55	42
Aucune différence significative entre les médianes des variables morphométriques par durée de carrière				
<i>Effectifs des chevaux de 6 ans</i>			71	78
Aucune différence significative entre les médianes des variables morphométriques par durée de carrière				

□ Chevaux de 4 ans

Parmi les chevaux de notre échantillon mesurés à 4 ans et possédant un indice de performance en 2019, plusieurs mesures morphométriques sont significativement différentes entre les groupes de durée de carrière : la **hauteur à la croupe**, la **longueur du tronc**, la **longueur du bassin**, du **tibia** et de la **phalange du membre postérieur**, sont plus petites chez les chevaux ayant eu une carrière en endurance de dix ans ou plus par rapport aux chevaux dont la durée de carrière est inférieure à dix ans. Chez ces derniers, **l'inclinaison du bassin** est aussi plus marquée et **l'angle de la hanche** plus ouvert à l'âge de 4 ans par rapport aux chevaux avec une durée de carrière qui dépasse l'âge de dix ans.

Les autres mesures morphométriques ne présentent pas de différence significative entre les groupes de durée de carrière, parmi l'échantillon de chevaux de 4 ans.

□ Chevaux de 5 et 6 ans

Aucune différence significative entre les médianes des mesures morphométriques à l'âge de 5 et 6 ans n'est mise en évidence entre les groupes de chevaux selon leur durée de carrière par rapport à dix ans.

• *Surfaces, rapports, et indices calculés*

Dans chaque classe d'âge de notre échantillon, aucune différence significative entre les variables morphométriques calculées n'est mise en évidence entre les groupes de chevaux dont la carrière en endurance a duré plus, ou strictement moins de dix ans.

d. Relation entre la morphologie et la participation aux compétitions d'endurance de haut niveau

Dans cette partie, nous incluons dans l'étude l'échantillon des 162 chevaux qui n'ont pas d'indice de performance 2019. L'objectif de cette partie est d'identifier d'éventuelles différences morphologiques et morphométriques, au jeune âge, chez des chevaux qui poursuivent en compétition de haut niveau dans la discipline d'endurance par rapport à ceux dont la carrière en endurance n'atteint pas le haut niveau.

Nos deux groupes d'étude sont d'une part, les « **compétiteurs** », c'est-à-dire les chevaux indicés en 2019, qui ont eu une carrière de compétition d'endurance de haut niveau en France, et des chevaux non indicés en 2019 mais qui ont concouru en compétitions FEI à l'international ; et les « **non compétiteurs** » d'autre part, qui comprend les chevaux non indicés qui n'ont pas atteint le haut niveau en compétition d'endurance. Ce dernier groupe inclus les chevaux décédés, ceux dont la carrière a été détournée vers une autre discipline, vers une pratique de loisir, ou encore mis à la reproduction. Notre effectif est toujours étudié par classes d'âge.

Comme pour l'étude de la longévité de carrière, on utilise le test de Student pour les variables quantitatives dont on considère la distribution comme suivant une loi normale, et celui de Mann-Whitney Wilcoxon pour les autres variables quantitatives.

Les résultats dont l'association est statistiquement significative avec un alpha à 0,05 sont surlignés en gras dans les tableaux qui suivent. L'ensemble des p-value obtenues pour les tests de comparaison des moyennes ou médianes de chaque variable morphologique ou morphométrique, entre les groupes de compétiteurs de haut niveau ou non, est accessible en annexe 5, pour chaque classe d'âge.

- *Paramètres morphologiques*

Les variables de morphologie qui présentent une différence significative de moyenne parmi les groupes de chevaux compétiteurs ou non sont résumées dans le tableau 25, par classe d'âge.

Tableau 26 : Résultats significatifs des tests de Student sur les moyennes des variables morphologiques entre les chevaux compétiteurs ou non, par classe d'âge

Variable morphométrique	p-value	« Compétiteurs »	« Non compétiteurs »
<i>Effectifs des chevaux de 4 ans</i>			
		65	44
Aucune différence significative entre les moyennes et médianes des variables morphologiques par classe de compétiteurs			
<i>Effectifs des chevaux de 5 ans</i>			
		114	40
HG	0,005	154,0^a	151,8^b
PT	0,03	175,0^a	172,5^b
LC	0,04	154,2^a	151,6^b
<i>Effectifs des chevaux de 6 ans</i>			
		189	37
HG	0,03	153,1^a	151,4^b
Poids	0,04	408,0^a	394,1^b

HG = Hauteur au Garrot ; PT = Périmètre Thoracique ; LC = Longueur Corporelle

□ Chevaux de 4 ans

Les moyennes des paramètres morphologiques ne sont pas significativement différentes selon la participation aux compétitions d'endurance chez les chevaux mesurés à l'âge de 4 ans.

□ Chevaux de 5 ans

Les chevaux compétiteurs sont en moyenne significativement plus **hauts au garrot** ($p < 0,01$), plus **longs** ($p < 0,05$), et ont un **périmètre thoracique plus important** ($p < 0,05$), à l'âge de 5 ans, que les chevaux du même âge qui ne participent pas aux compétitions d'endurance au cours de leur carrière.

□ Chevaux de 6 ans

Les chevaux compétiteurs sont en moyenne significativement plus **hauts au garrot** ($p < 0,05$) et plus **lourds** ($p < 0,05$), à l'âge de 6 ans, que ceux du même âge qui ne participent pas aux compétitions de haut niveau.

Les autres paramètres morphologiques ne présentent pas de différences significatives, à l'âge de 6 ans, entre les chevaux compétiteurs en haut niveau et les chevaux non compétiteurs en endurance de notre échantillon.

- *Variables morphométriques*

Les variables morphométriques qui présentent une différence significative de moyenne parmi les classes de carrières sont résumées dans le tableau 27, par classe d'âge.

Tableau 27 : Résultats significatifs de test de comparaison des moyennes (Student) ou médianes (Mann-Whitney Wilcoxon) des variables morphométriques entre les chevaux compétiteurs ou non, pour chaque classe d'âge

Variable morphométrique		p-value	« Compétiteurs »	« Non compétiteurs »
<i>Effectifs des chevaux de 4 ans</i>			63	42
Aucune différence significative entre les moyennes et médianes des variables morphométriques par classe de compétiteurs				
<i>Effectifs des chevaux de 5 ans</i>			110	39
POSTERIEURS	TIBIA	0,0053	0,48^a	0,45^b
	AGRASSET	0,0202	116,3^a	118,6^b
<i>Effectifs des chevaux de 6 ans</i>			195	37
TAILLE	TAILLEC	0,0237	1,52^a	1,49^b
LIGNE DU DESSUS	IEPAULEPOINTEHANCHE	0,0459	- 7,0^a	- 5,5^b
ANTERIEURS	METACARPE	0,0429	0,31^a	0,30^b
POSTERIEURS	COXAE	0,0233	0,36^a	0,35^b
	SACRE	0,0408	0,32^a	0,31^b

□ Chevaux de 4 ans

Les variables morphométriques mesurées sur les chevaux à 4 ans ne sont pas significativement différentes selon qu'ils soient compétiteurs de haut niveau au cours de leur carrière ou non dans notre échantillon d'étude.

□ Chevaux de 5 ans

Le **tibia** est significativement plus long à 5 ans chez les chevaux qui sont compétiteurs de haut niveau en endurance par rapport à ceux qui ne le sont pas. Les compétiteurs de haut niveau présentent un **angle du grasset**, à 5 ans, significativement plus fermé que ceux qui ne concourent pas à haut niveau.

Les autres variables morphométriques ne présentent pas de différences significatives de moyenne ou médiane entre les groupes de chevaux de 5 ans selon leur participation à des compétitions de haut niveau dans leur carrière, dans notre échantillon.

□ Chevaux de 6 ans

Les chevaux en compétition à haut niveau sont plus **hauts à la croupe**, à l'âge de 6 ans, et ont une **inclinaison de l'axe entre l'épaule et la pointe de la hanche** plus marquée, une longueur de **métacarpe** plus importante et un **bassin** plus long, que ceux ne performant pas à haut niveau au cours de leur carrière.

Les autres variables morphométriques ne présentent pas de différences significatives de moyenne ou de médiane entre les groupes de chevaux de 6 ans de notre échantillon selon leur participation à des compétitions de haut niveau dans leur carrière.

- Surfaces, rapports, et indices calculés

Les variables morphométriques calculées qui présentent une différence significative de moyenne ou médiane parmi les compétiteurs ou non sont résumées dans le tableau 28, par classe d'âge.

Tableau 28 : Résultats significatifs des tests de comparaison des moyennes (Student) ou médianes (Mann-Whitney Wilcoxon) des variables morphométriques calculées entre les groupes de compétiteurs de haut niveau, par classe d'âge

Variable morphométrique		p-value	« Compétiteurs »	« Non compétiteurs »
<i>Effectifs des chevaux de 4 ans</i>			63	42
Aucune différence significative entre les moyennes et médianes des variables morphométriques par classe de compétiteurs				
<i>Effectifs des chevaux de 5 ans</i>			110	39
Aucune différence significative entre les moyennes et médianes des variables morphométriques par classe de compétiteurs				
<i>Effectifs des chevaux de 6 ans</i>			189	37
SURFACES	S _{HODGSON}	0,0444	4,35^a	4,2^b
	S _{BRODY}	0,0428	3,89^a	3,81^b
INDICES SURFACIQUES	I _{HODGSON}	0,0386	93,6^a	92,7^b
	I _{BRODY}	0,0416	104,6^a	103,3^b
RAPPORTS Triangle postérieur	GRASSETPTEHANCHE	0,0035	0,62^a	0,51^b
	COXAE/GRASSETPTEHANCHE	0,0221	0,57^a	0,70^b
	FEMUR/GRASSETPTEHANCHE	0,0048	0,68^a	0,86^b

□ Chevaux de 4 et 5 ans

Les moyennes ou médianes des paramètres morphométriques calculés ne sont pas significativement différentes chez les chevaux de notre échantillon mesurés à l'âge de 4 et 5 ans, selon qu'ils soient ou non des compétiteurs de haut niveau durant leur carrière.

□ Chevaux de 6 ans

Les **surfaces et indices surfaciques**, établis à l'âge de 6 ans, sont significativement plus grands chez les chevaux de notre échantillon qui participent à de l'endurance à haut niveau par rapport à ceux qui n'y participent pas

La **longueur entre le grasset et la pointe de la hanche** est significativement plus grande chez les chevaux de 6 ans de notre échantillon qui sont compétiteurs de haut niveau par rapport à ceux qui ne le sont pas. Le grasset plus éloigné de la hanche leur confère aussi des **rapports du triangle postérieur** significativement plus faibles, c'est-à-dire une croupe plus haute et courte, à 6 ans, que les chevaux qui ne concourent pas à haut niveau dans leur carrière.

4. Discussion

Cette étude explore les paramètres morphologiques et morphométriques, mesurables chez les jeunes chevaux de 4 à 6 ans, qui pourraient être associés à la performance de carrière et à la longévité dans la discipline d'endurance.

Le nombre de variables utilisées est élevé, et la performance est étudiée selon plusieurs axes et points de vue. Ainsi, les résultats significatifs obtenus avec un seuil de significativité fixé à 0,05 sont à prendre avec de nombreuses précautions. En l'état actuel des choses, l'ensemble des résultats obtenus dans la partie précédente le sont à un risque d'erreur inconnu, supérieur à 5%. Il nous est donc impossible d'inférer à la population des jeunes chevaux Arabes ou croisés Arabe de laquelle est issu notre échantillon d'étude.

Notre étude n'a donc pas pour accomplissement d'identifier les paramètres morphologiques du jeune cheval Arabe, ou croisé Arabe, prédictifs de la performance. En revanche, elle identifie plutôt une liste de paramètres morphologiques d'intérêt potentiel pour l'étude des corrélations entre la morphologie et la performance, et dont l'association réelle avec la performance de carrière dans d'autres échantillons doit être confirmée par des analyses complémentaires.

A. Limites de la méthodologie

Si notre étude repose sur un échantillon assez large de 489 chevaux, et raisonnablement représentatif de la population des jeunes chevaux d'endurance en France, notre analyse fait face à un défaut majeur : le manque de confiance quant à la significativité des résultats. En effet, notre étude consiste en un test statistique multiple et n'utilise pas de p-value corrigée. Ainsi, nous ne pouvons mettre en évidence que des tendances ou des suspicions de liens entre la morphologie des jeunes chevaux Arabes et leur performance à long terme.

a. Significativité des résultats

Dans le cadre d'un test statistique multiple dont l'objectif serait de confirmer des hypothèses selon lesquelles chaque variable morphologique ou morphométrique étudiée est associée à la performance en endurance, il aurait fallu corriger notre seuil de significativité, usuellement fixé à 0,05.

L'une des méthodes applicables lorsque les tests effectués sont nombreux est la méthode de Bonferroni, qui permet de corriger le risque alpha de 0,05 définissant le seuil de significativité en le divisant par un facteur de correction déterminé par le nombre de tests statistiques effectués. Dans notre étude, nous dénombrons :

- 56 données morphologiques et morphométriques ;
- un test de corrélation par rapport aux 4 indices de performance ;
- un test d'analyse de variance entre 3 catégories d'IRE ;
- deux tests de comparaison des moyennes/médianes de deux groupes binaires (longévité de carrière et compétition à haut niveau ou non) ;
- et tous ces tests sont effectués pour les 3 classes d'âge.

Nous traitons donc les données selon un test multiple composé de $56 * 3 * (4 + 3 + 1 + 1) = 1\ 512$ tests statistiques. Le seuil de significativité corrigé devrait donc être, selon la méthode de Bonferroni : $0,05 / 1\ 512 = 3,3 * 10^{-5}$ soit **0,000033**.

Aucun de nos résultats ne présente de p-value inférieure à ce seuil. Ainsi, nous n'avons aucune certitude quant à la véracité de nos résultats et le risque d'avoir identifié, à tort, des corrélations ou différences statistiques dans notre échantillon n'est pas évalué et est potentiellement grand (Desquilbet, 2022).

b. Amélioration du protocole de l'étude

Bien qu'aucune étude n'ait précédemment été réalisée en mettant en lien les paramètres morphologiques ou morphométriques au jeune âge d'une part, et la performance de carrière des chevaux d'endurance d'autre part, nous aurions pu choisir d'avoir une approche plus ciblée sur nos critères d'étude afin de confirmer, si possible, les résultats des études précédentes portées sur la morphologie et la performance des chevaux Arabes et/ou d'endurance.

Dans le cadre d'un protocole d'étude de confirmation de l'association entre des données morphologiques ou morphométriques avec la performance des chevaux d'endurance, nous aurions pu jouer sur 3 axes afin de centrer notre étude sur quelques tests d'intérêt majeur.

Restreindre les variables de morphologie :

Nous aurions pu nous focaliser sur un nombre limité de variables morphologiques et morphométriques. D'après la bibliographie, plusieurs travaux mettent en évidence des traits morphologiques propres aux chevaux Arabes et/ou aux chevaux utilisés en endurance, (Gregory, 2014a ; Métayer *et al.*, 2004 ; Misheff *et al.*, 2010). Ces paramètres jouent-ils un rôle dans le fait que l'on considère les chevaux Arabes comme performant dans la discipline ? Est-ce qu'un cheval Arabe avec ces traits morphologiques « typiques » d'autant plus marqués est d'autant plus performant ? D'autre part, les études de Tribout (2013) et Triquenaux (2015) mettent en évidence, dans leur échantillon de chevaux Arabes, respectivement adultes et jeunes, quelques paramètres morphologiques corrélés, bien que faiblement, aux indices de performance en endurance.

Ainsi, et à titre d'exemple, il nous aurait été possible de restreindre nos 56 paramètres morphologiques et morphométriques d'étude aux 16 variables de morphologie condensées dans le tableau suivant, et dont l'intérêt est justifié par la bibliographie.

Tableau 29 : Sélection de 16 variables morphologiques et morphométriques dont l'intérêt pour l'analyse de corrélation avec la performance est justifié dans la bibliographie

Variable sélectionnée	Justification de son intérêt	Source bibliographique
MORPHOLOGIE		
Hauteur au Garrot	Le cheval Arabe est de petite taille	(Métayer et al., 2004)
Périmètre Thoracique	Le cheval Arabe est plutôt fin, celui d'endurance a un périmètre thoracique moins grand que celui de show	(Cervantes et al., 2009)
Longueur Corporelle	La longueur corporelle est positivement corrélée à l'indice distance	(Tribout, 2013)
Pli Cutané	Le pli cutané est négativement corrélé à l'indice de distance	(Tribout, 2013)
MORPHOMETRIE mesurée		
VIDESST	Les membres du cheval Arabe sont plutôt courts, donc ils sont près du sol, avec un vide sous sternal plutôt réduit	(Gregory, 2014a)
ENCOLURE	Elle doit être longue pour jouer son rôle de balancier, mais pas trop lourde pour ne pas surcharger l'épaule	(Métayer et al., 2004)
IEPAULE	Une épaule verticale favorise l'économie d'énergie	(Métayer et al., 2004)
DOSARR et ADOS	Le cheval d'endurance a un dos assez court et creux	(Métayer et al., 2004)
HGARROT	Le cheval d'endurance a un garrot saillant La hauteur du garrot est positivement corrélée à l'IRE et à l'indice de vitesse	(Métayer et al., 2004) (Triquenaux, 2015)
IBASSIN	Un bassin incliné favorise l'amplitude du galop	(Métayer et al., 2004)
IFEMUR	Le fémur est long et peu incliné L'inclinaison du fémur est négativement corrélée à l'indice vitesse	d'après Barrey, 2003, cité par Colin de Verdière (2014) (Tribout, 2013)
<u>GRASSETPOINTEHANCHE</u>	Le grasset est plus proche de la hanche chez le cheval d'endurance	(Cervantes et al., 2009)
AGRASSET	L'angle du grasset est négativement corrélé à l'indice de distance	(Tribout, 2013)
AJARRET	Un jarret fermé est favorable à la performance du cheval d'endurance	d'après Barrey, 2003, cité par Colin de Verdière (2014)
MORPHOMETRIE calculée		
<u>ICPROFIL</u>	L'indice corporel de profil est négativement corrélé à l'indice distance. Une morphologie longiligne (IC < 1) favorise les allures rasantes	(Tribout, 2013) (Gregory, 2014b)

□ Restreindre les classes d'âge :

Concernant les classes de chevaux de 4, 5 ou 6 ans respectivement, l'étude de Triquenaux (2015) ne met en évidence que quelques variables morphologiques significativement différentes entre une ou plusieurs classes d'âge. Cela concerne uniquement la longueur de l'humérus et du radius et celle de la hanche à la pointe de la hanche (nommée SACRE). Aucune des variables sélectionnées plus haut n'en fait partie. Cette absence de significativité ne prouve pas que les chevaux de 4, 5 et 6 ans ont les mêmes mensurations concernant ces paramètres morphologiques, ou qu'ils ne changent pas de morphologie avec l'âge. Comme pour notre étude, le manque de puissance statistique peut être la cause d'une absence de mise en évidence d'une association réelle, entre un paramètre morphologique et l'âge, dans la population des jeunes chevaux Arabes ou croisés Arabes. Cependant, nous pouvons estimer que les trois classes d'âge se ressemblent sur les 16 variables morphologiques sélectionnées.

Les effectifs de chevaux de 4, 5 et 6 ans de notre échantillon, se ressemblent en termes de proportion des trois sexes et des différentes races, bien que ces observations ne soient pas présentées dans l'étude. Concernant les variables de performance (tableau 16), les trois classes diffèrent légèrement avec des chevaux davantage performants parmi les 6 ans, mais l'absence de différence extrême entre nos groupes d'âge peut nous motiver à les fusionner en un seul échantillon d'étude en conservant, *a priori*, un échantillon représentatif de la population.

Nous aurions ainsi pu décider d'étudier notre échantillon total sans distinction d'âge à la prise des mesures, en prenant tout de même la précaution de supprimer les chevaux doublons. Cette situation est rencontrée pour 19 chevaux de l'étude qui ont, par exemple, participé à deux sessions de prise de mesure lors de deux années consécutives et à deux âges différents. Ces chevaux ont une valeur d'IRE unique puisque leur performance est évaluée sur leur carrière complète et indépendamment de l'âge auquel ils ont participé aux sessions de mesure. Puisque notre démarche s'inscrit dans la détermination de facteurs morphologiques sur lesquels appliquer de la sélection génétique le plus précocement possible, nous pourrions décider de n'utiliser que les données de morphologie collectées au plus jeune âge pour ces chevaux doublons. Cela réduirait notre échantillon total à 470 chevaux, constituant un groupe unique de jeunes chevaux âgés de 4 à 6 ans à la prise des mesures.

□ Restreindre les critères de jugement de la performance :

Puisque les indices de performance IRE sont une somme pondérée des indices de vitesse, classement et distance, il est possible de considérer que si un paramètre morphologique est réellement et fortement associé à un indice unitaire de performance (vitesse ou classement ou distance), alors l'association pourra se refléter à travers l'IRE.

De plus, l'IRE est publié par l'INRAE pour comparer l'ensemble des chevaux de la discipline d'endurance entre eux, en ajustant sur l'âge et le sexe, bien que sa précision dépende de chaque individu et du nombre d'informations disponibles. Pourquoi chercher à définir la performance autrement ? Classer les valeurs d'IRE en plusieurs catégories permet de visualiser la performance de manière qualitative ordinaire du type « chevaux moyens / bons / très bons / excellents /... » mais cette information persiste dans l'utilisation de l'IRE en variable quantitative.

Ainsi, nous aurions pu choisir de n'étudier la performance qu'à travers les indices quantitatifs d'IRE.

□ Etude des corrélations, à titre d'exemple

Afin d'avoir un ordre d'idée du degré de significativité attendu, nous avons appliqué ces trois lignes de restriction à notre étude et effectué une analyse statistique rapide, dont les résultats sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 30 : Résultats des tests statistiques de corrélation de Pearson ou Spearman entre les variables morphologiques ou morphométriques sélectionnées et l'IRE, sur l'échantillon total de 470 chevaux, avec correction de Hölm

Variable	r	p	p' lorsque p < 0,05
Hauteur au Garrot	0,16	0,0038	0,057
Périmètre Thoracique	0,04	0,48	
Longueur Corporelle	0,10	0,07	
<u>Pli Cutané</u>	0,001	0,98	
VIDESST	0,13	0,02	0,33
ENCOLURE	0,05	0,45	
IEPAULE	0,04	0,49	
DOSARR	0,11	0,06	
ADOS	0,09	0,15	
HGARROT	- 0,04	0,55	
IBASSIN	- 0,004	0,95	
IFEMUR	- 0,08	0,15	
<u>GRASSETPOINTEHANCHE</u>	0,03	0,96	
AGRASSET	- 0,07	0,22	
AJARRET	- 0,05	0,38	
<u>ICPROFIL</u>	- 0,04	0,51	

r = coefficient de corrélation ; p = p-value avant correction ;
p' = p-value corrigée par la méthode de Holm

L'association, plutôt encourageante ($p < 0,01$), entre la hauteur au garrot et l'IRE, disparaît après correction de Hölm. Cet exemple illustre la difficulté de mettre en évidence des corrélations faibles lorsque plusieurs variables sont impliquées.

Précisons que la majorité de l'échantillon utilisé est issu de la collecte des données de Triquenaux (2015) et qu'il aurait été préférable de changer totalement l'échantillon d'étude si nous avions voulu confirmer ses résultats établis avec les performances définies par l'IRE 2012. Malheureusement, notre étude s'inscrit dans une démarche de très long terme puisque, pour avoir une information précise de la performance des chevaux, il est préférable d'utiliser leurs indices de performance après plusieurs années de compétitions et de succès.

c. Réduction des biais

□ Biais de sélection dans nos échantillons classés par âge

Nous observons de nombreuses corrélations et différences significatives sur des critères de morphologie des chevaux de 4 ans, en relation avec la performance, qui ne sont pas retrouvés dans les échantillons de chevaux de 5 et 6 ans. Comme l'évoque Triquenaux (2013), les chevaux Arabes finissent leur croissance plutôt précocement et ne subissent pas de changement morphologique ou morphométrique majeur à partir de cet âge. Ainsi, si de réelles corrélations et associations existaient entre la morphologie à 4 ans et les performances futures, il est raisonnable de penser qu'elles seraient statistiquement observables dans nos échantillons de 5 et 6 ans, dont les effectifs plus importants, confèrent aux analyses une puissance statistique vraisemblablement meilleure. Or ce n'est pas le cas.

Une explication pourrait être la présence d'un biais de sélection dans notre échantillon de chevaux présentés à Uzès à l'âge de 4 ans, davantage composé de chevaux « tout venant » d'éleveurs régionaux de race Arabe. L'un des objectifs de ces manifestations de la Société Hippique Française étant la valorisation des chevaux pour la vente, il est possible que notre échantillon de chevaux de 4 ans contienne davantage de chevaux qui ne sont pas spécifiquement élevés pour du haut niveau en endurance, avec des morphologies plus variées, mais pour lesquels des éleveurs de loisir cherchent à tester les capacités éventuelles en endurance et bénéficier d'une bonne visibilité commerciale. Si l'on compare nos effectifs de chevaux compétiteurs versus non-compétiteurs de haut niveau dans la figure 26 (sous-partie II.3.B.f), il est en effet difficile de considérer les proportions comme équivalentes dans les trois classes d'âge.

L'échantillon de chevaux de 5 ans présente aussi, au sein des chevaux non indicés, un pourcentage deux fois plus important de chevaux mis à la reproduction que dans les autres classes d'âge. Il n'est pas exclu que plusieurs juments ayant déjà eu un poulain, soient ensuite présentées à Uzès pour tester leurs capacités d'endurance, à l'âge de 5 ans, puis retournent à la reproduction.

Les effectifs de jeunes chevaux de 5 et 6 ans, présentés pour la deuxième voire troisième année consécutive aux épreuves d'Uzès, pourraient être plus homogènes en termes d'ambition de carrière, et de plus grand intérêt pour l'étude spécifique des chevaux performeurs en endurance. Cependant, une faible corrélation entre performance et morphologie serait d'autant plus difficile à mettre en évidence dans ces échantillons très homogènes.

- Biais de classement sur les données de performance :

IRE

Nos valeurs d'IRE, transmises par l'INRAE, peuvent être considérées comme fiables puisqu'elles s'accompagnent d'un coefficient de détermination minimal de 0,6. Cependant, ce coefficient est établi à partir de la précision des trois indices unitaires de vitesse, classement et distance, qui présentent parfois un coefficient beaucoup plus faible. Les corrélations entre la morphologie et ces indices unitaires peuvent donc être altérées par cette imprécision, mais les valeurs d'IRE sont les plus fiables et les plus uniformisées possibles sur l'ensemble de la population sur lesquelles nous baser pour quantifier la performance des chevaux d'endurance.

Longévité de carrière

Considérée seule, la longévité telle que nous l'avons définie est difficile à interpréter. Contrairement à la longévité « fonctionnelle » étudiée par exemple pour les chevaux de CSO dans le cadre du projet LifeS (Dugué *et al.*, 2021), qui vise à déterminer des facteurs précoces de jugement d'une capacité physiologique à concourir, ou non, un grand nombre de saisons au cours de sa carrière ; nos informations sont restreintes à l'âge maximal auquel le cheval a participé à des compétitions, en 2019.

Notre distinction en deux groupes part du postulat que si un cheval arrête les compétitions au cours de sa carrière, il n'y retournera pas. Or, il est possible d'imaginer qu'un cheval ayant de bons résultats en endurance soit vendu pour un usage de loisir, puis revendu, quelques années plus tard, à un cavalier reprenant les compétitions jusqu'à du haut niveau. Si un tel cheval passe ses dix ans avec son cavalier de loisir, alors il constitue un exemple de biais de classement pour notre étude. Nous aurions ainsi pu vérifier, pour chaque cheval considéré comme ayant fini sa carrière avant l'âge de 10 ans, s'il n'avait pas concouru en endurance entre les années 2020 et 2023, afin de réduire ces biais.

Aussi, afin de distinguer des chevaux qui ne participent qu'aux épreuves Jeunes Chevaux puis arrêtent les compétitions, de ceux qui participent à plusieurs saisons de concours, nous aurions pu définir, pour chaque cheval, une variable de longévité de carrière définie comme le nombre de saisons de compétitions auxquelles l'individu a participé. La fédération écossaise d'endurance (Scottish Endurance Riding Club, 2023) remet par exemple un prix annuel aux deux ou trois chevaux accomplissant leur douzième saison d'endurance. Une saison est selon elle, définie comme une année durant laquelle le cheval se qualifie sur au moins six courses, tous niveaux confondus, tant que les courses sont encadrées par une fédération officielle et que l'état du cheval est validé au contrôle vétérinaire final.

Compétition à haut niveau ou non

De plus, notre étude ne prend aucunement en compte des données médicales des chevaux. Nos groupes de compétiteurs de haut niveau versus non-compétiteur de haut niveau peuvent être biaisés par des arrêts précoces de carrière, sur un cheval très prometteur, en cas d'accident ou de blessure invalidante par exemple. La collecte de telles informations pourrait, là aussi, réduire les biais de classement en écartant de l'analyse des chevaux dont on n'a pas pu voir l'expression des performances.

B. Apports de notre l'étude

Malgré les imperfections de protocole et la difficulté de conclusion, résumons, pour chaque catégorie de variables morphologiques et morphométriques, les résultats de notre étude considérés comme significatifs, sans correction du risque d'erreur alpha, et qui justifient d'un possible intérêt dans l'étude des corrélations ou associations avec la performance.

a. Données d'intérêt concernant le format des chevaux

□ Mensurations

Les figures suivantes résument les caractéristiques morphologiques associées à au moins un paramètre de performance de carrière en endurance, dans au moins un groupe d'âge, au sein de notre échantillon.

Figure 28 : Bilan des corrélations significatives obtenues entre les variables morphologiques (à gauche) et morphométriques (à droite) relatives au format, avec les indices de performance des chevaux de notre échantillon classés par âge

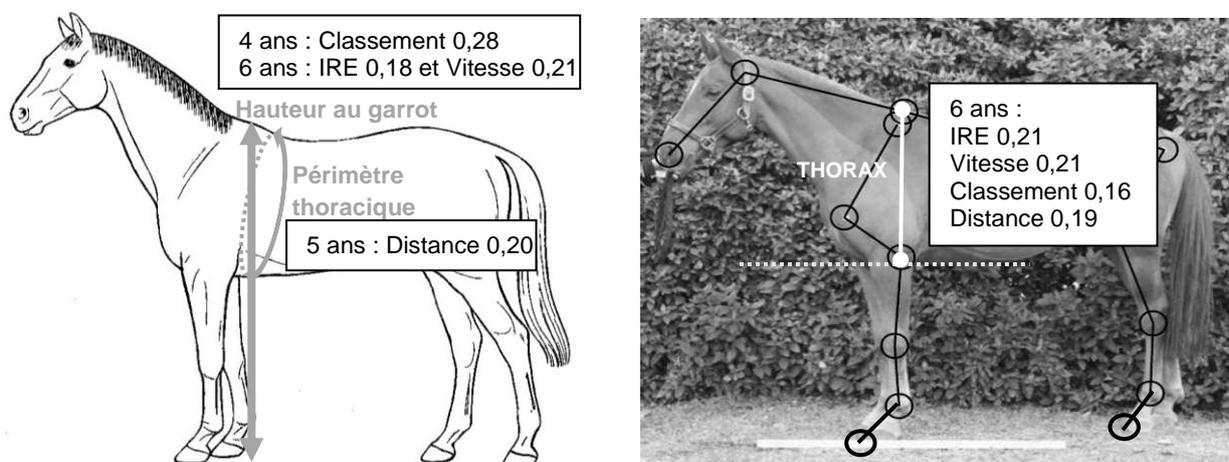
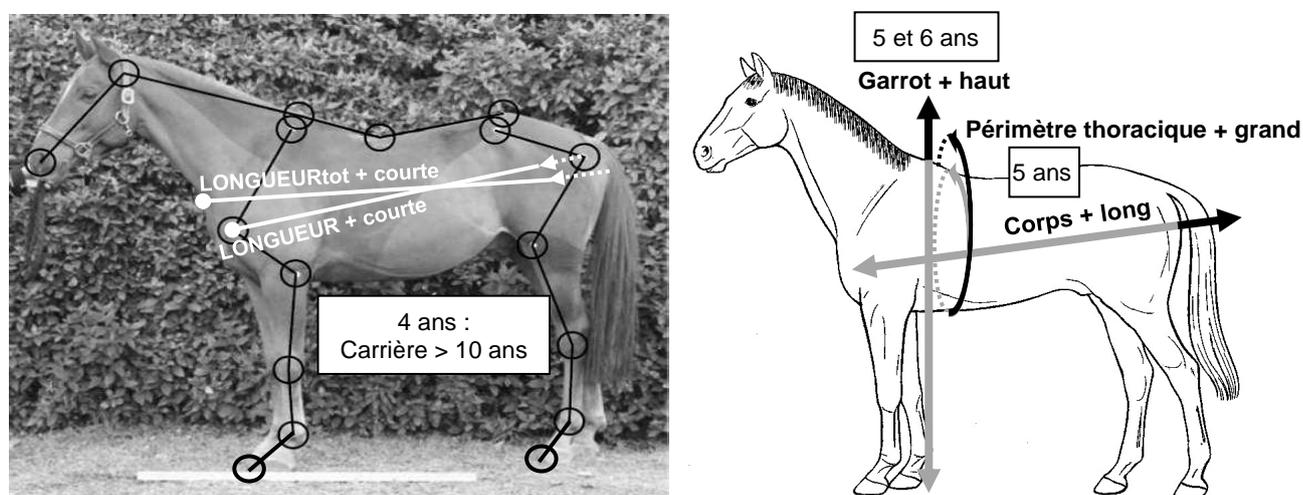


Figure 29 : Bilan des différences significatives obtenues entre les variables morphologiques et morphométriques, selon la durée de carrière (à gauche) et la compétition à haut niveau (à droite) des chevaux de notre échantillon classés par âge



Qu'il s'agisse de la performance traduite par les valeurs quantitatives des indices ou par la participation ou non à de l'endurance de haut niveau, il apparaît que les chevaux de plus grand format, à 5 et 6 ans, dans notre échantillon, ont de meilleures performances dans la discipline. Ces observations sont partiellement cohérentes avec les résultats des études de Triquenaux (2015) et Tribout (2013), montrant toutes deux une association entre des éléments de performance et une plus grande longueur corporelle, respectivement chez le jeune cheval Arabe et chez l'adulte, mais n'en montrant aucune avec la hauteur au garrot.

Un cheval de grand format (plus haut et/ou plus long) présente une surface corporelle plus importante, qui favorise l'efficacité du système de thermorégulation cutané. De plus, le périmètre thoracique plus élevé à 5 ans chez les chevaux compétiteurs de haut niveau peut suggérer une meilleure capacité pulmonaire avec un pourvoir d'oxygénation optimisé et, là encore, un système de thermorégulation par les voies respiratoires amélioré.

Ces observations sont cohérentes avec la littérature portée sur d'autres races : la hauteur au garrot et la longueur du corps chez les jeunes galopeurs sont deux paramètres associés à leurs performances futures (Smith *et al.*, 2006). Chez les trotteurs aussi, il existe une corrélation positive entre la hauteur au garrot et la performance (Janczarek *et al.*, 2017). Cependant, chez les chevaux de saut d'obstacle, la hauteur au garrot présente une corrélation négative avec la fréquence des foulées au trot (- 0,25) et au galop (- 0,32) (Ricard *et al.*, 2020a). Appliquée au cheval d'endurance, une telle corrélation semblerait défavorable. Notre hypothèse est que les chevaux de saut d'obstacle sont justement travaillés pour avoir une allure rebondissante, suspendue, encourageant les mouvements dorso-ventraux, à l'inverse des chevaux d'endurance chez qui l'on préfère une allure rasante et économique.

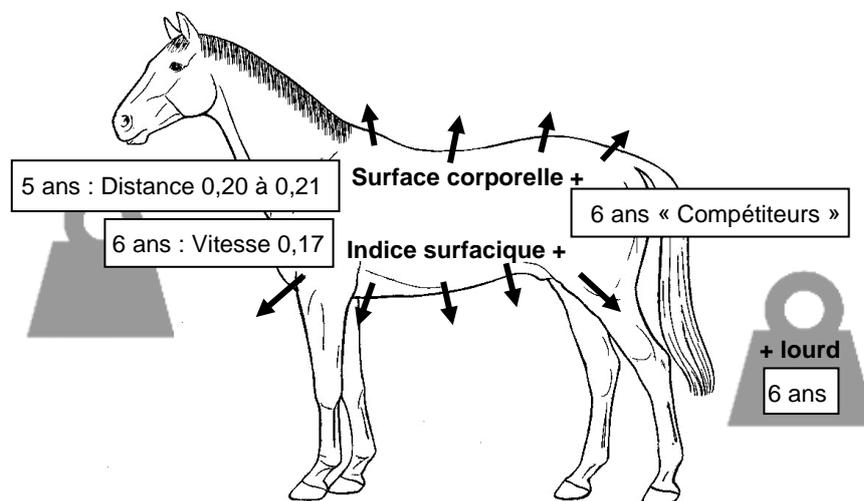
D'un point de vue biomécanique, la longueur corporelle est liée à la longueur des foulées qui, avec la fréquence, sont les deux paramètres déterminant la vitesse de l'allure (Barrey *et al.*, 2001). Chez les trotteurs, la vitesse maximale est corrélée à la performance (Barrey *et al.*, 1995), et elle est davantage corrélée à la longueur qu'à la fréquence de foulée. Pour une allure symétrique comme le trot, c'est la flexion latérale de la colonne qui permet d'augmenter la longueur des foulées tandis qu'au galop, allure asymétrique, ce sont les mouvements de flexion, en phase de suspension, et d'extension en phase d'appui et de propulsion, de la colonne dans l'axe dorso-ventral qui favorisent la longueur des foulées (Denoix, 1999). Il est raisonnable de penser que, plus la longueur corporelle est importante, plus l'effet « ressort » de la colonne est marqué et apporte de l'amplitude aux foulées.

Comment expliquer alors nos résultats concernant les chevaux de 4 ans qui, pour ceux dont la carrière en endurance est longue, apparaissent en moyenne plus courts que ceux dont la carrière est interrompue avant les dix ans d'âge ? Cela s'inscrit en opposition avec les résultats et les études cités plus haut. Le premier élément à relever est que cette association n'est pas observée dans nos échantillons de chevaux de 5 et 6 ans, dont les effectifs sont pourtant supérieurs à ceux des chevaux de 4 ans, et dont on pourrait logiquement considérer la puissance statistique comme meilleure. Notons aussi que les mesures manuelles, au ruban, n'ont pas montré de différence significative de moyenne selon la durée de carrière chez les chevaux de 4 ans. Il est donc raisonnable de penser que l'association statistique obtenue est due au hasard et au risque d'erreur inconnu, plus élevé que 5 %.

□ Poids et surface corporelle :

Les formules de surface et indices surfaciques, définies dans la partie 2.B.d. sont des variables calculées qui dépendent largement du poids. Les résultats significatifs obtenus dans notre étude sont résumés sur la figure suivante.

Figure 30 : Bilan des corrélations et différences significatives obtenues entre les variables de poids et surfaces, avec les indices de performance et la compétition à haut niveau, chez les chevaux de notre échantillon classés par âge



Comme développé dans la partie bibliographique, la surface corporelle présente un intérêt majeur dans les mécanismes de thermorégulation en augmentant la surface cutanée de production de sueur. Cet avantage peut expliquer que des chevaux avec une plus grande surface soient plus performants selon l'indice de distance. Pourtant, l'indice surfacique, défini comme le rapport entre le poids et la surface, illustre la capacité calorifique du cheval. Pour un même kg de muscle, le cheval avec un meilleur indice surfacique a une plus petite surface pour évacuer sa chaleur. Cela peut paraître contre-intuitif et défavorable, mais nous observons que les chevaux les plus performants en termes d'indice de vitesse, distance, et participation au haut niveau ont un indice surfacique augmenté. Notre hypothèse est que, si la capacité de thermorégulation est un facteur limitant en course d'endurance, le poids des masses musculaires est tout aussi important pour la puissance de la locomotion et la réussite en course. Un cheval Arabe plus dense, plus lourd, avec des masses musculaires plus développées pour une surface équivalente serait plus puissant dans sa locomotion.

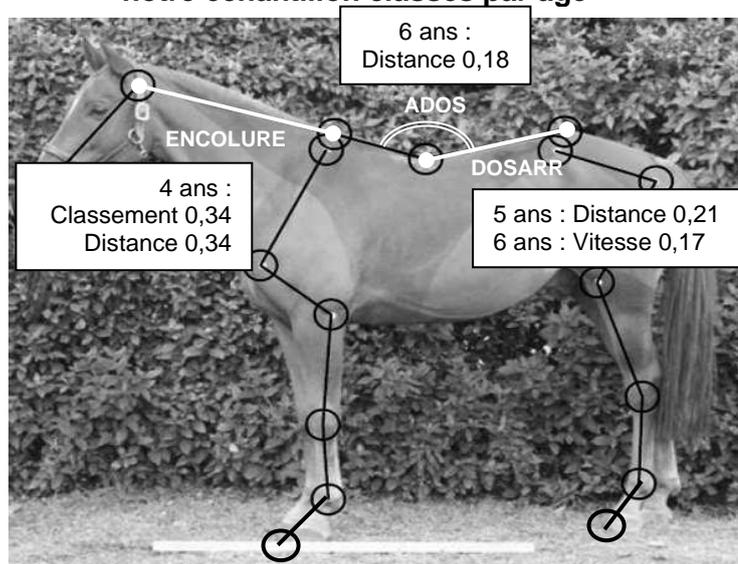
Notons tout de même qu'il existe de nombreuses formules pour évaluer la surface et qu'aucune ne fait réellement consensus. Bien qu'il en existe aussi beaucoup chez l'homme, elles prennent toutes en compte la taille et le poids. La définition d'un calcul de surface basé sur la longueur du corps, la hauteur au garrot et le poids aurait pu être davantage informative sur le rôle précis de la surface corporelle dans la performance à travers les phénomènes de thermorégulation mais, à notre connaissance, aucune étude ne décrit de formule de surface corporelle spécifiquement chez le cheval Arabe.

b. Données d'intérêt concernant les mensurations des chevaux

□ Colonne dorsale

Les résultats significatifs de notre étude, relatifs aux mensurations du squelette axial sont illustrés sur la figure suivante.

Figure 31 : Bilan des corrélations significatives obtenues entre les variables de mensuration de la ligne du dos, avec les indices de performance chez les chevaux de notre échantillon classés par âge



Les chevaux de 4 ans semblent avoir une encolure significativement et positivement corrélée à leur indice de classement et de distance. Si cette association est réelle, dans notre échantillon, alors une hypothèse pour l'expliquer est son implication dans les mécanismes de thermorégulation, développés dans la sous-partie II-B-b de notre étude bibliographique. L'encolure est une surface cutanée dont la densité en glandes sudoripares est particulièrement élevée, jouant donc un rôle majeur dans la dissipation de chaleur par transpiration. Les voies respiratoires hautes qui y circulent, proportionnellement à sa taille, permettent aussi l'évaporation d'eau. Par ailleurs, une corrélation entre une encolure courte et la présence de trouble musculo-squelettique au niveau des membres a aussi été récemment mise en évidence sur un échantillon de 51 chevaux de saut d'obstacle (Mostafa et Elemmawy, 2020). Si, les enjeux locomoteurs en course d'endurance et en saut d'obstacle sont bien distincts, nous pouvons tout de même suspecter l'encolure de jouer un rôle majeur dans l'équilibration et la régularité des allures.

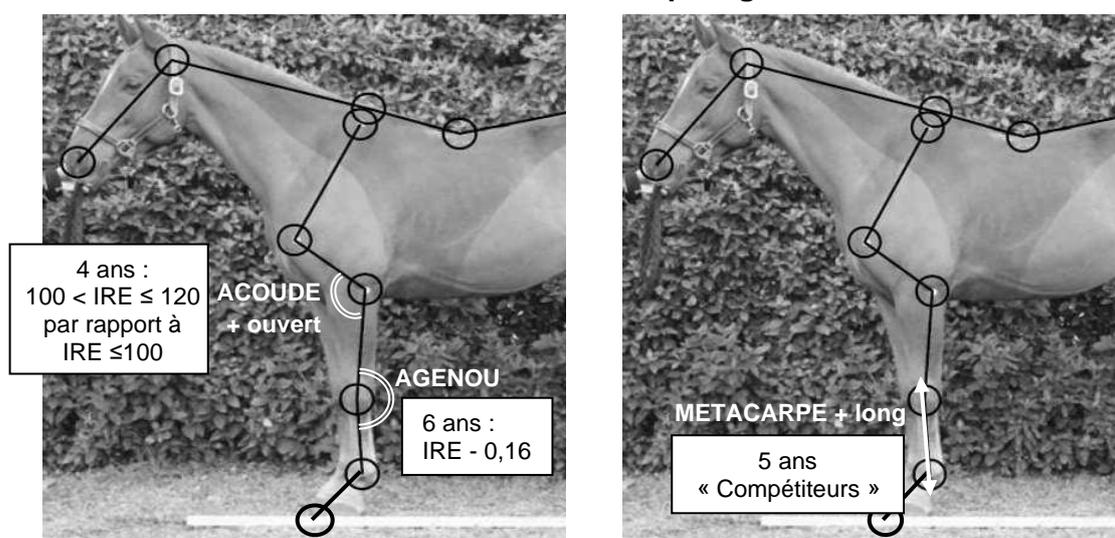
Concernant l'axe dorsal, un dos plus plat, moins creusé, chez les chevaux de 6 ans semble être favorable à l'indice de distance, ce qui est en opposition avec les résultats de Métayer *et al.* (2004), selon lesquels les chevaux Arabes d'endurance ont un dos plutôt creux. Mais cette étude inclut différentes races, alors que nous nous focalisons sur une population de chevaux Arabes ou croisés Arabes. Aussi, la longueur de la partie caudale du dos semble être positivement corrélée à l'indice de distance pour les chevaux de 5 ans et l'indice de vitesse pour ceux de 6 ans. Si ces associations entre un dos plus plat et plus long vers l'arrière est réelle, dans nos échantillons de chevaux de 5 et 6 ans, avec les indices de distance et/ou vitesse, alors nous pourrions l'expliquer par le fait que la longueur du dos, et en particulier la partie lombaire, favorise l'engagement des postérieurs sous la masse corporelle (Denoix, 1999). Notre hypothèse est qu'un cheval avec un dos plus plat est davantage « gainé » et qu'il dispose d'un meilleur pouvoir de flexion de sa colonne

dorsale dans le galop, avec d'autant plus d'engagement, et donc de longueur de foulée, que sa partie lombaire est longue.

Notons cependant que sur les grilles de notation de la SHF, consultables en Annexe 1, les reins courts sont au contraire valorisés par rapport à des reins longs.

□ Chaîne antérieure

Figure 32 : Bilan des corrélations et différences significatives obtenues entre les variables de mensuration de la ligne des antérieurs, avec les indices de performance et la compétition à haut niveau chez les chevaux de notre échantillon classés par âge



Si l'on se focalise sur la morphométrie du membre antérieur, seul l'angle du carpe (AGENOU) présente une corrélation significative avec l'IRE, chez les chevaux de 6 ans, avec un coefficient faiblement négatif évalué à $-0,16$. Cette corrélation est soutenue par un résultat significatif avec notre modélisation par classes de la valeur d'IRE, selon laquelle le groupe des chevaux aux meilleurs IRE présente un angle du carpe moyen de $179,2^\circ$, à 6 ans, contre $180,3^\circ$ pour celui aux moins bons IRE.

Ces résultats suggèrent que les chevaux au genou arqué (ou brassicourt), c'est-à-dire dont l'articulation est en avant par rapport au reste du membre, seraient plus performants, dans notre échantillon, que ceux dont le carpe est bien droit voire un peu plus ouvert, illustrant un genou dit creux. Auteurs et cavaliers s'accordent sur le fait qu'un genou arqué est à favoriser par rapport à un genou creux et que « si le premier est un défaut, le second est une faiblesse » (Roush, 2011). Nous pouvons supposer qu'un genou arqué réduit l'angle de protraction, défini par Sapone *et al.* (2021) comme l'angle du canon par rapport à la verticale, dans la phase de suspension au trot. Or moins la protraction est importante, moins le poser du pied s'effectue en avant du cheval et plus la foulée est courte, ce qui défavorise la vitesse du cheval. Cependant, un genou creux est associé à de nombreuses affections orthopédiques, d'autant plus fréquentes que l'allure du cheval est rapide. Chez le Pur-sang de course, il a été identifié que l'hyperextension du carpe prédispose aux lésions

tendineuses et ligamentaires palmaires, aux compressions articulaires dorsales, à la sclérose osseuse voire aux fractures intra-articulaires (Burn *et al.*, 2006 ; Lenoir, 2003).

Notre analyse de la performance par classes d'IRE met aussi en avant une différence significative d'angulation du coude selon la catégorie d'IRE. Les chevaux de 4 ans dont l'IRE est entre 100 et 120 auraient un coude plus ouvert que ceux dont l'IRE est plus faible. Or les coefficients de corrélations ne mettent pas en évidence de relation linéaire entre l'angle du coude et l'IRE. Cette différence n'est retrouvée dans aucune autre analyse, y compris sur les plus grands effectifs de chevaux de 5 et 6 ans, dont on peut considérer la puissance statistique comme meilleure. Il est possible que cette différence d'angulation du coude de l'ordre de quatre degrés (135,3° versus 131,3°) obtenue dans l'échantillon des chevaux de 4 ans par classe d'indice soit due au hasard.

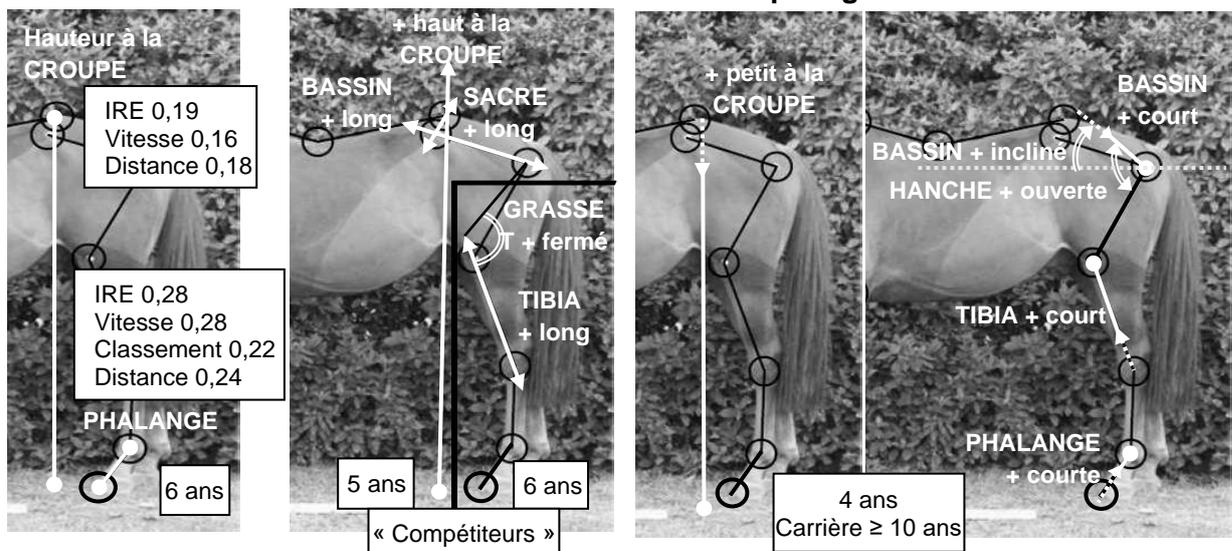
Les chevaux compétiteurs de haut niveau présentent un métacarpe plus long d'en moyenne un centimètre, à 5 ans, que les chevaux non compétiteurs de haut niveau (0,31 m contre 0,30 m). Cela peut s'expliquer par le fait que ces chevaux sont aussi significativement plus grands dans notre échantillon. Or, la hauteur au garrot est corrélée à la longueur des rayons osseux distaux. Triquenaux (2015) évalue par exemple ces coefficients, sur son échantillon de jeunes chevaux Arabes, entre 0,19 (pour la mesure du métacarpe) et 0,32 (pour les longueurs des phalanges). Onar *et al.* (2018) définissent même des formules, basées sur la longueur du métacarpe mesurée sur un cliché radiologique et la mesure à la toise de la hauteur au garrot de chevaux actuels, dans plusieurs races, pour estimer la hauteur au garrot de chevaux anciens à partir de leur squelette.

Il est tout de même important de garder en tête que ces différences mises en évidence ne sont que de l'ordre du degré pour l'angle du carpe, et du centimètre pour la longueur du métacarpe. Il est possible que ces résultats soient la conséquence de l'imprécision des mesures effectuées par l'opérateur au pointage des structures anatomiques sur photographie numérique.

□ Chaîne postérieure

Les variables morphométriques de la ligne postérieure susceptibles d'être liées à la performance dans notre échantillon semblent bien plus nombreuses que pour la chaîne antérieure. Cela n'est pas surprenant si l'on admet que les postérieurs sont souvent considérés comme le moteur des allures, notamment au galop, et que leur efficacité est primordiale en course d'endurance. La figure suivante regroupe les résultats significatifs obtenus précédemment concernant les rayons osseux, angles et inclinaisons impliquant le membre postérieur.

Figure 33 : Bilan des corrélations et différences significatives obtenues entre les variables de mensuration de la ligne des postérieurs, avec les indices de performance (à gauche), la compétition à haut niveau (au milieu) et la longévité de carrière (à droite) chez les chevaux de notre échantillon classés par âge



La hauteur de la croupe et la longueur des phalanges postérieures, chez les chevaux de 6 ans, présentent des corrélations positives, parmi les plus élevées de notre étude, avec plusieurs indices de performance. Si l'on considère que la hauteur à la croupe reflète la longueur globale du membre postérieur, il est raisonnable de penser que plus la croupe est haute, plus l'amplitude des foulées est grande, et la locomotion est rapide pour une même fréquence d'allure. Cette hypothèse est encouragée par les résultats obtenus chez les chevaux de 5 et 6 ans « compétiteurs », dont différents rayons osseux du membre postérieur semblent significativement plus longs que chez les chevaux qui ne concourent pas à haut niveau. Par analogie avec la biomécanique de la protraction du membre antérieur, évoquée dans la sous-partie précédente, on peut supposer que plus les rayons osseux sont longs, plus le poser du pied s'effectue en dessous du cheval lors de la phase de protraction, et plus ample est la foulée. Or la bibliographie décrit une silhouette favorable aux allures rasantes avec des rayons osseux supérieurs et moyens longs (épaules, bras, avant-bras, tibia) et des rayons inférieurs courts (canons, phalanges) (Gregory, 2014b). Sur ce point, nos résultats sont partiellement divergents, puisqu'ils valorisent aussi des rayons distaux longs. Nous pouvons aussi remarquer qu'à la différence de Tribout (2013), dont l'étude sur les chevaux adultes met en évidence une corrélation entre l'inclinaison du fémur et l'indice de vitesse ; ce sont plutôt les autres rayons osseux qui présentent des différences significatives entre nos groupes d'étude. Nous l'évoquerons dans la suite mais, l'inclinaison du fémur présente un coefficient de corrélation avec

l'IRE, chez les chevaux de 4 ans de notre étude, évalué à -0,23 et en fait un critère morphologique tout de même important.

Notre échantillon de chevaux de 6 ans « compétiteurs » semble présenter un grasset plus fermé. Si ce résultat est aussi obtenu par Tribout (2013) sur les chevaux adultes, il est controversé dans la littérature puisqu'un grasset fermé diminuerait la propulsion et nécessiterait la mobilisation d'une plus grande masse musculaire pour la propulsion.

De plus, Barrey (2003), cité par Colin de Verdière (2014), relève qu'un jarret fermé, un fémur long et peu incliné par rapport à l'horizontale sont des éléments de conformation favorables à la performance. Sur ce dernier point, les résultats de Tribout (2013) se portaient en contradiction avec une corrélation modérée entre la vitesse et une forte inclinaison du fémur ($r = 0,42$). Nos résultats ne sont pas concluants concernant ces rayons osseux.

Dans notre échantillon de chevaux de 4 ans, au contraire, des rayons osseux (bassin, tibia, et phalanges postérieures) plus courts de l'ordre de 2 à 3 cm sont mis en évidence chez les chevaux à la plus longue durée de carrière. Concernant le bassin, il apparaît qu'une plus forte inclinaison du bassin avec une hanche ouverte serait associée à une meilleure longévité de carrière. Ces résultats, concordants avec la description de Métayer (2004) de l'arrière-main des chevaux d'endurance, sont aussi soutenus par la conformation du triangle postérieur des chevaux de 6 ans de notre étude, dont les compétiteurs de haut niveau semblent avoir une croupe haute et courte, avec des rayons osseux du bassin et du fémur d'autant plus courts que le grasset est proche de la hanche. Ces résultats rappellent ceux de Cervantes (2009) qui, en comparant les morphologies des chevaux Arabes de show et d'endurance, met en évidence que ces derniers ont un bassin plus haut et un grasset plus proche de la hanche que les Arabes de show. Notre hypothèse est, qu'encore une fois, cette conformation de bassin incliné avec un grasset proche de la hanche favorise l'engagement des postérieurs sous la masse corporelle au galop et l'efficacité de l'allure.

Nos résultats sur la conformation du membre postérieur ne sont pas tous cohérents avec les résultats de la littérature. Les mesures reposent sur l'identification de la hanche par palpation, qui est parfois rendue difficile par les masses musculaires qui s'y superposent. Une autre hypothèse évoquée par Triquenaux (2015) pour expliquer la dissonance des résultats est que les chevaux de 4 et 5 ans se placent moins bien au carré.

c. Sélection de variables d'intérêt selon leurs coefficients de corrélation avec l'IRE

Quelle que soit la valeur brute de p-value obtenue dans notre étude, il est intéressant de se pencher sur les coefficients de corrélations observés. Cela nous permet d'identifier des paramètres morphologiques d'intérêt pour l'étude du lien entre la morphologie et la performance, lorsqu'elle n'est définie que par la valeur de l'IRE. Notons tout de même que les coefficients obtenus dans notre étude sont décevants car globalement faibles. Pour les sélectionner, nous suggérons de conserver les variables qui présentent avec l'IRE :

- un coefficient de corrélation parmi les plus élevés de notre étude, par exemple supérieur à 0,20 en valeur absolue, dans au moins une classe d'âge ;
- et/ou des coefficients de corrélation non négligeables pour les trois classes d'âge, par exemple supérieurs à 0,10 en valeur absolue.

Le tableau suivant répertorie les variables de notre étude qui répondent au moins à l'un des deux critères précités.

Tableau 31 : Variables morphologiques sélectionnées par rapport à leurs coefficients de corrélation obtenus avec l'IRE, dans notre étude, par classe d'âge

Variable sélectionnée (NOM et définition)		4 ans	5 ans	6 ans
HG	Hauteur au garrot à la toise	0,22	0,14	0,18
DOSARR*	Longueur entre le creux du dos et le sommet de la croupe	- 0,18	0,18	0,16
PHALANGEP*	Longueur de la phalange postérieure	- 0,12	0,10	0,28
Poids	Poids sur la balance	0,14	0,19	0,14
SHODGSON	Formule de surface corporelle ou d'indice surfacique relatif au poids	0,14	0,19	0,14
S _{BRODY}		0,14	0,19	0,14
IS _{BRODY}		0,13	0,19	0,14
IS _{HODGSON}		0,12	0,20	0,14
TAILLEC*	Hauteur au sommet de la croupe	- 0,14	0,10	0,19
VIDESST*	Hauteur de vide sous le sternum	0,17	0,11	0,10
LC	Longueur entre la pointe de l'épaule et la pointe de la fesse, au mètre ruban	0,11	0,16	0,11
HG/TAILLEC*	Rapport entre les hauteurs au garrot et à la croupe	0,32	- 0,02	- 0,04
THORAX*	Profondeur du thorax	0,08	0,08	0,21
ENCOLURE*	Longueur de l'encolure	0,26	0,05	0,00
IFEMUR*	Inclinaison du fémur par rapport à l'horizontale	- 0,23	0,02	- 0,07
IC _{RELATIF}	Indice corporel relatif	- 0,20	- 0,07	0,00

* Variables mesurées par le logiciel Equimétrie®

Sous réserve de ne choisir qu'une seule variable illustrant la surface du cheval, puisque les résultats des surfaces et indices surfaciques présentent des coefficients de corrélations sensiblement égaux, ce tableau nous fournit une liste de 13 variables qui semblent, dans notre

étude, d'intérêt potentiel pour l'analyse des corrélations entre la morphologie et la performance en endurance définie par la valeur d'IRE.

Notons tout de même que pour sept des seize variables, les résultats concernant les chevaux de 4 ans les corrélations avec l'IRE vont dans le sens inverse de celles des chevaux de 5 et 6 ans pour les mêmes variables. Les coefficients de corrélations en question sont encadrés dans le tableau précédent. L'origine de ces divergences est difficile à expliquer. Une hypothèse serait une différence dans la composition de l'effectif de chevaux de 4 ans (origine régionale versus plus nationale pour les chevaux de 5 et 6 ans). La plus grande difficulté à placer correctement les chevaux de 4 ans pour les photos est une autre explication possible. Quelle qu'en soit l'origine, cette hétérogénéité de résultats justifie la nécessité d'autres études pour valider cette sélection de variables.

Aussi, certaines variables sélectionnées dans le tableau précédent sont directement déduites les unes des autres ou fortement corrélées entre elles. En particulier la variable « HG/TAILLEC » dépend de la hauteur au garrot HG et de la taille à la croupe TAILLEC. De même, l'addition des segments THORAX et VIDESST qui mesurent respectivement la profondeur du thorax et la distance entre le sternum et le sol, correspond à la hauteur au garrot. Il serait judicieux de ne choisir que des variables d'étude qui ne sont pas redondantes.

C. Perspectives

Notre étude est la première, à notre connaissance, à évaluer les corrélations entre la morphologie des jeunes chevaux d'endurance et leurs performances à long terme. Elle présente des failles rendant l'interprétation de nos résultats difficiles, mais constitue une base pour de futures analyses : nous avons identifié quelques variables morphologiques et morphométriques sur lesquelles il serait intéressant de se focaliser, en réitérant l'analyse sur un autre échantillon, et en uniformisant la définition de la performance.

□ Renouveler l'échantillon d'étude

L'idéal serait de réaliser une nouvelle session de prise de mesures, sur un nouvel échantillon de nombreux jeunes chevaux Arabes ou croisés Arabe, et de collecter les informations relatives à leurs performances tout au long de leur carrière, idéalement jusqu'à leur réforme. Les résultats de cette nouvelle étude ne seraient disponibles que dans plus de 10 ans. Ce pas de temps est gigantesque à l'échelle de l'élevage du cheval (il peut y avoir 2 générations en 10 ans) et des évolutions de la discipline.

□ Utilité d'une sélection génétique exclusivement sur la morphologie

Cette étude a été menée à la demande des éleveurs de chevaux d'endurance, dans l'espoir de trouver des critères morphologiques pour la sélection précoce de leurs produits. Une sélection exclusivement basée sur la morphologie soulève cependant deux interrogations.

D'une part, d'après nos résultats, il semblerait que les paramètres morphologiques favorables à la performance (selon la valeur d'IRE et la participation au haut niveau) soient plutôt en défaveur d'une carrière longue. Bien que les résultats présentés en ce sens concernent l'échantillon de chevaux de 4 ans, dont on a discuté la fiabilité des résultats plus haut, cela suggère qu'une sélection tournée vers l'amélioration de la performance en endurance se ferait au détriment de la longévité de carrière des chevaux. Améliorer la performance des chevaux pour les fragiliser au long terme et réduire la durée de leur carrière impose une réflexion autour du respect du bien-être animal.

Ensuite, l'étude de l'association entre d'autres paramètres intrinsèques aux chevaux et leur performance semble essentielle avant tout établissement d'un programme de sélection génétique. L'étude de l'association entre la performance en endurance et des paramètres physiologiques impliqués dans l'effort doit être menée en complément de la présente étude. Si des paramètres s'avèrent liés à la performance et/ou la longévité sportive, alors, c'est l'ensemble des critères morphologiques et physiologiques d'intérêt qui devront être pris en compte dans le programme de sélection. Nous pouvons citer la physiologie cardiaque, dont l'étude a été initiée par Trachsel *et al.* (2016) ; la physiologie respiratoire, largement étudiée chez les pur-sang et trotteurs, sur tapis de course ou sur le terrain (Evans, 2007) ; la physiologie musculaire, dont on a vu que la typographie des fibres était déterminée à la naissance, puis modifiée par l'entraînement (Rivero et Hill, 2016) ; ou encore le tempérament, dont la bonne héritabilité mais la complexité des traits est évoquée par Ricard (2010).

□ Inclure la morphologie dans un modèle multifactoriel de la performance

Notre étude ne prend pas en compte de nombreux paramètres, même intuitifs, dont l'influence sur la performance est forte, en raison de leur difficulté de modélisation. Le premier que l'on peut citer est l'expérience du cavalier, dont on a précisé dans l'analyse bibliographique que la technique de monte influençait l'optimisation de l'allure sur les courses (Viry *et al.*, 2013). La vigilance du cavalier, sa conscience à l'égard des capacités physiologiques de sa monture, sa gestion des entraînements, sont d'autres éléments qui peuvent impacter les performances. Une modélisation de grande ampleur de ces multiples facteurs d'influence de la performance ou de la contre-performance trouverait son intérêt pour une gestion plus raisonnée et respectueuse de la carrière sportive des chevaux d'endurance.

En effet, sous réserve que de réelles corrélations existent entre la morphologie chez le jeune cheval et la performance en endurance, et que l'héritabilité des caractères morphologiques en question résulte en une sélection efficace par les éleveurs, la production de poulains Arabes plus adaptés à l'endurance perdrait tout son intérêt si l'ensemble des acteurs autour d'eux ne font pas tout leur possible pour que la performance s'exprime.

Conclusion

Ce travail s'est inscrit dans la démarche de réponse aux questions suivantes : la carrière d'un cheval d'endurance est-elle influencée par sa morphologie ? Est-il possible d'utiliser des critères morphologiques pour sélectionner les chevaux ? Les critères mis en évidence sur les performances précoces des jeunes chevaux ont-ils toujours un intérêt si l'on étudie la carrière complète des chevaux ?

Notre analyse s'appuie sur une partie de l'échantillon d'étude de Triquenaux (2015), qui met en évidence que la longueur corporelle, la hauteur au garrot et la longueur et l'inclinaison du fémur, sont des critères liés à la performance immédiate des jeunes chevaux. Si ces caractéristiques du fémur ne sont pas retrouvées dans notre étude, nous observons qu'un grand format, se traduisant par un garrot et une croupe plus hauts, un thorax large et profond, et un poids plus élevé, semble être favorable à l'obtention d'un bon indice de performance de carrière. Concernant la longévité de carrière, nos analyses sont contradictoires et semblent plutôt favoriser un jeune cheval moins long et aux rayons osseux du membre postérieur plus courts. D'autres études doivent donc être menées pour confirmer nos hypothèses.

Notre travail s'accorde avec ceux de Triquenaux (2015) et Tribout (2013) sur un point : prouver l'existence de corrélations entre la morphologie et la performance sur une carrière complète, si elles existent véritablement, dans le but de concevoir un programme de sélection génétique sur la seule base de quelques critères morphologiques est difficile. Selon nous, il ne faudrait pas accorder une importance excessive à la morphologie dans la sélection des jeunes chevaux, bien qu'elle reste un argument commercial pour les acheteurs dont l'œil est sensible à l'harmonie. L'association entre d'autres paramètres intrinsèques et la performance devrait être approfondie afin d'identifier des critères distincts de la morphologie sur lesquels une sélection génétique pourrait être appliquée. Ces critères pourraient concerner l'anatomie et la physiologie cardiaques et respiratoires, le tempérament, ou encore la santé.

Enfin, notre étude relève l'interrogation suivante : sélectionner sur la performance est-il contradictoire avec la longévité en compétition ? Peut-on justifier du respect du bien-être animal si les chevaux sélectionnés et performants apparaissent plus fragiles au long terme ? Il pourrait donc être pertinent de poursuivre ces études en mettant en parallèle l'intensité de performance et la longévité de carrière.

Liste des références bibliographiques

- ANCELET, E. (2014) Les raids d'endurance équestre, Crépin Leblond.
- ART, T., AMORY, H., LEKEUX, P. (2000) Notions de base de physiologie de l'effort. *Pratique Vétérinaire Équine*, vol. 32, p. 247-254.
- AUNE, A., FENNER, K., WILSON, B., *et al.* (2020) Reported Behavioural Differences between Geldings and Mares Challenge Sex-Driven Stereotypes in Ridden Equine Behaviour. *Animals* vol. 10, n° 3, p. 414. [<https://doi.org/10.3390/ani10030414>]
- BAILEY, E. (2014) Heritability and the equine clinician. *Equine Veterinary Journal* vol. 46, n° 1, p. 12-14. [<https://doi.org/10.1111/evj.12196>]
- BARNES, A., KINGSTON, J., BEETSON, S., *et al.* (2010) Endurance veterinarians detect physiologically compromised horses in a 160 km ride. *Equine Veterinary Journal. Suppl.* 38, p. 6-11. [<https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.2010.00225.x>]
- BARNES, A.L. (2014) Training Endurance Horses. In Hodgson, D.R., McKeever, K.H., McGowan, C.M. (Éd.), *The Athletic Horse: Principles and Practice of Equine Sports Medicine.*, 2e éd. St. Louis, W.B. Saunders, p. 314-320.
- BARREY, E. (2014) Genetic basis of equine performance. In Hinchcliff, K.W., Kaneps, A.J., Geor, R.J. (Éd.), *Equine Sports Medicine and Surgery*, 2e éd., St. Louis, W.B. Saunders, p. 43-58.
- BARREY, E. (1992) Evaluation de l'aptitude sportive chez le cheval : application à la définition de critères précoces de sélection. *INRAE Productions Animales* vol. 5. [<https://doi.org/10.20870/productions-animales.1992.5.HS.4281>]
- BARREY, E., AUVINET, B., COUROUCÉ, A. (1995) Gait evaluation of race trotters using an accelerometric device. *Equine Veterinary Journal* vol. 27, Suppl. 18, p. 156-160. [<https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.1995.tb04910.x>]
- BARREY, E., EVANS, S.E., EVANS, D.L., *et al.* (2001) Locomotion evaluation for racing in thoroughbreds. *Equine Veterinary Journal. Suppl.* 33, p. 99-103. [<https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.2001.tb05369.x>]
- BARTHÉLÉMY, C. (2020) Adaptation génétique et détection de la sélection dans le cadre d'évolutions expérimentales. Thèse de doctorat en Sciences. La Tremblade, Université de La Rochelle, Laboratoire de Génétique et Pathologie des Mollusques Marins Station Ifremer.
- BENAMOU-SMITH, A. (2003) Affections médicales du cheval d'endurance. *Journées AVEF*, 30, 31 octobre & 1er novembre 2003, Montpellier, p. 203-206.
- BENNET, E.D., PARKIN, T.D.H. (2020) The impact of the mandatory rest period in Fédération Equestre Internationale endurance events. *Equine Veterinary Journal* vol. 52, n° 2, p. 268-272. [<https://doi.org/10.1111/evj.13148>]
- BERGERO, D., ASSENZA, A., CAOLA, G. (2005) Contribution to our knowledge of the physiology and metabolism of endurance horses. *Livestock Production Science* vol. 92, p. 167-176. [<https://doi.org/10.1016/j.livprodsci.2004.11.019>]
- BRITO, G., DAMIÁN, J.P., SUÁREZ, G., *et al.* (2023) Characterization of Raid Hipico Uruguayo Competencies by Ride Type: Causes of Death and Risk Factors. *Animals* vol. 13, n° 10, p. 1602. [<https://doi.org/10.3390/ani13101602>]
- BRODY, S., LARDY, H.A. (1946) Bioenergetics and Growth. *Journal of Physical Chemistry* vol. 50, n° 2, p. 168-169. [<https://doi.org/10.1021/j150446a008>]
- BUHL, R., ERSBØLL, A.K. (2012) Echocardiographic evaluation of changes in left ventricular size and valvular regurgitation associated with physical training during and after maturity in Standardbred trotters. *Journal of the American Veterinary Medical Association* vol. 240, n° 2, p. 205-212. [<https://doi.org/10.2460/javma.240.2.205>]
- BURN, J.F., PORTUS, B., BROCKINGTON, C. (2006) The effect of speed and gradient on hyperextension of the equine carpus. *The Veterinary Journal* vol. 171, n° 1, p. 169-171. [<https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2004.10.010>]

- CERVANTES, I., BAUMUNG, R., MOLINA, A., *et al.* (2009) Size and shape analysis of morphofunctional traits in the Spanish Arab horse. *Livestock Science* vol. 125, n° 1, p. 43-49. [<https://doi.org/10.1016/j.livsci.2009.03.006>]
- CHABCHOUB, A., LANDOLSI, F., JARY, Y. (2004) Étude des paramètres morphologiques de chevaux Barbes de Tunisie. *Revue de Médecine Vétérinaire* vol. 155, n° 1, p. 31-37.
- CHARLES RIVER EDITORS (2017) The Pony Express : The History and Legacy of America's Most Famous Mail Service.
- COLIN DE VERDIÈRE, J. (2014) Caractérisation de la locomotion du cheval d'endurance : critères associés à la performance en course à vitesse libre. Thèse de doctorat vétérinaire. Ecole nationale vétérinaire d'Alfort.
- COLLEAU, J.J., JACQUES, J. (1996) Evaluation génétique des animaux d'élevage. *INRA Productions Animales* vol. 9 Hors-Serie, p. 27-40.
- COTTIN, F., BARREY, E., LOPES, P., *et al.* (2006) Effect of repeated exercise and recovery on heart rate variability in elite trotting horses during high intensity interval training. *Equine Veterinary Journal. Suppl.* 36, p. 204-209. [<https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.2006.tb05540.x>]
- COUROUCÉ A. (2022) La médecine sportive appliquée au cheval athlète - Evaluation de la performance et de la contre-performance. Cours magistral. Goustranville, CIRALE, Ecole nationale vétérinaire d'Alfort, Unité pédagogique de la Dominante Sciences Cliniques des Equidés.
- COUROUCÉ, A., CHRÉTIEN, M., VALETTE, J.P. (2002) Physiological variables measured under field conditions according to age and state of training in French Trotters. *Equine Veterinary Journal* vol. 34, n° 1, p. 91-97. [<https://doi.org/10.2746/042516402776181141>]
- CRICHAN, H. (2019) Performances à l'international & indices en endurance. Webconférence. In *IFCE*. [<https://www.ifce.fr/ifce/connaissances/webconferences/elevage-et-entretien/performances-a-l-international-indices-en-endurance/>] (consulté le 02/10/2023).
- CYWINSKA, A., GORECKA, R., SZARSKA, E., *et al.* (2010) Serum amyloid A level as a potential indicator of the status of endurance horses. *Equine Veterinary Journal. Suppl.* 38, p. 23-27. [<https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.2010.00280.x>]
- CYWINSKA, A., WITKOWSKI, L., SZARSKA, E., *et al.* (2013) Serum amyloid A (SAA) concentration after training sessions in Arabian race and endurance horses. *BMC Veterinary Research* vol. 9, n° 1, p. 91. [<https://doi.org/10.1186/1746-6148-9-91>]
- DENOIX, J.-M. (1999) Spinal Biomechanics and Functional Anatomy. *Veterinary Clinics of North America: Equine Practice* vol. 15, n° 1, p. 27-60. [[https://doi.org/10.1016/S0749-0739\(17\)30162-1](https://doi.org/10.1016/S0749-0739(17)30162-1)]
- DESQUILBET, L. (2022) Introduction aux tests statistiques multiples. Polycopié., Version 3.3. Maisons-Alfort, Ecole nationale vétérinaire d'Alfort, Département des Sciences Biologiques et Pharmaceutiques.
- DETILLEUX, J. (2022) Les étapes d'un programme de sélection. Présentation In *ACA France*. Liège, University of Liege, Department of Veterinary management of animal resources. [<https://www.acafrance.org/userfiles/files/ACA%202020/Compilation%20Interventions.pdf>] (consulté le 09/10/2023)
- DOLIGEZ, P., GENOUX, N., HAEFFNER, L. (2023) Évaluer la note d'état corporel de son cheval : une nécessité. In *IFCE*. [<https://equipedia.ifce.fr/elevage-et-entretien/alimentation/nutrition-et-ration/evaluer-la-note-detat-corporel-de-son-cheval-une-necessite>] (consulté le 16/10/2023).
- DOYLE, J., CARROLL, C., CORBALLY, A., *et al.* (2022) An overview of international genetic evaluations of show jumping in sport horses. *Translational Animal Science* vol. 6. [<https://doi.org/10.1093/tas/txac038>]
- DUBOIS, C., RICARD, A. (2007) Efficiency of past selection of the French Sport Horse: Selle Français breed and suggestions for the future. *Livestock Science*, Special section: Non-Ruminant Nutrition Symposium vol. 112, n° 1, p. 161-171. [<https://doi.org/10.1016/j.livsci.2007.02.008>]

- DUGUÉ, M., DUMONT SAINT PRIEST, B., CRICHAN, H., *et al.* (2021) Genomic Correlations Between the Gaits of Young Horses Measured by Accelerometry and Functional Longevity in Jumping Competition. *Frontiers in Genetics* vol. 12, n° 619947. [https://doi.org/10.3389/fgene.2021.619947]
- EVANS, D.L. (2007) Physiology of equine performance and associated tests of function. *Equine Veterinary Journal* vol. 39, n° 4, p. 373-383. [https://doi.org/10.2746/042516407x206418]
- FEDERACIÓN ECUESTRE URUGUAYA (2023) Site officiel de la Fédération Equestre d'Uruguay. [https://www.federacionecuestreuruguay.com.uy/] (consulté le 18/09/2023).
- FEDERATION EQUESTRE INTERNATIONALE (2022) Endurance – FEI Annual Report 2022. In *FEI Facts & Figures*. [https://inside.fei.org/fei/about-fei/publications/fei-annual-report/2022/feifactsandfigures/] (consulté le 22/08/2023).
- FEDERATION EQUESTRE INTERNATIONALE (2019) 2020 FEI Endurance Rules. In *FEI Insides*. Assemblée Générale, Moscou, 19 Novembre, [https://inside.fei.org/system/files/20.1_ANNEX%20GA19_ENDURANCE%20RULES%20M-ARK-UP.pdf] (consulté le 08/11/2023).
- FEDERATION FRANCAISE D'EQUITATION (2022a) Des Rencontres de l'Endurance au Parc équestre fédéral pour le développement et la pérennisation de la discipline. In *FFE Actualités*. [https://www.ffe.com/actualites/des-rencontres-de-l-endurance-au-parc-equestre-federal-pour-le-developpement-et-la-perennisation-de] (consulté le 27/11/2023).
- FEDERATION FRANCAISE D'EQUITATION (2022b) Règlement endurance 2023 applicable au 02.01.2023. In *FFE*. [https://www.ffe.com/pratiquer/disciplines/endurance] (consulté le 08/11/2023).
- FLAMINIO, M.J., RUSH, B.R. (1998) Fluid and electrolyte balance in endurance horses. *The Veterinary Clinics of North America. Equine Practice* vol. 14, n° 1, p. 147-158. [https://doi.org/10.1016/s0749-0739(17)30217-1]
- FLEMING, P.A., PAISLEY, C.L., BARNES, A.L., *et al.* (2013) Application of Qualitative Behavioural Assessment to horses during an endurance ride. *Applied Animal Behaviour Science* vol. 144, n° 1, p. 80-88. [https://doi.org/10.1016/j.applanim.2012.12.001]
- FOREMAN, J.H. (1998) The exhausted horse syndrome. *The Veterinary Clinics of North America. Equine Practice* vol. 14, n° 1, p. 205-219. [https://doi.org/10.1016/s0749-0739(17)30220-1]
- FRAIPONT, A., VAN ERCK, E., RAMERY, E., *et al.* (2011) Subclinical diseases underlying poor performance in endurance horses: diagnostic methods and predictive tests. *The Veterinary Record* vol. 169, n° 6, p. 154. [https://doi.org/10.1136/vr.d4142]
- GARLINGHOUSE, S.E., BURRILL, M.J. (1999) Relationship of body condition score to completion rate during 160 km endurance races. *Equine Veterinary Journal. Suppl.* 30, p. 591-595. [https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.1999.tb05290.x]
- GAZAGNADOU, D. (1993) Les postes à relais de chevaux chinoises, mongoles et mameloukes au XIIIe siècle : un cas de diffusion institutionnelle. *Actes des congrès de la Société des historiens médiévistes de l'enseignement supérieur public* vol. 24, n° 1, p. 243-250. [https://doi.org/10.3406/shmes.1993.1644]
- GHARAHVEYSI, S., KASHAN, N.E.J., GERAMI, A., *et al.* (2008) Estimation of genetic parameters on conformation traits of the Iranian Arab horses population. *Pakistan Journal of biological Sciences* vol. 11, n° 2, p. 280-284. [https://doi.org/10.3923/pjbs.2008.280.284]
- GHAVI HOSSEIN-ZADEH, N. (2021) A meta-analysis of genetic parameter estimates for conformation traits in horses. *Livestock Science* vol. 250, p. 104601. [https://doi.org/10.1016/j.livsci.2021.104601]
- GIONTELLA, A., SARTI, F.M., BIGGIO, G.P., *et al.* (2020) Genetic Parameters and Inbreeding Effect of Morphological Traits in Sardinian Anglo Arab Horse. *Animals* vol. 10, n° 5, p. 791. [https://doi.org/10.3390/ani10050791]
- GREGORY, B. (2014a) Conformation. In Hodgson, D.R., McKeever, K.H., McGowan, C.M. (Éd.), *The Athletic Horse: Principles and Practice of Equine Sports Medicine*, 2e éd. St. Louis, W.B. Saunders, p. 253-265. [https://doi.org/10.1016/B978-0-7216-0075-8.00024-1]
- GREGORY, B. (2014b) The biomechanics of equine locomotion. In Hodgson, D.R., McKeever, K.H., McGowan, C.M. (Éd.), *The Athletic Horse: Principles and Practice of Equine Sports Medicine*,

- 2e éd. St. Louis, W.B. Saunders, p. 266-281. [<https://doi.org/10.1016/B978-0-7216-0075-8.00025-3>]
- GUTHRIE, A.J. (1998) Thermoregulation : Base Mechanisms and Hyperthermia. *Veterinary clinics of North America : Equine Practice* vol. 14, n° 1, p. 45-59.
- HELLSTEN, E., GELINDER VIKLUND, Å., KOENEN, E., *et al.* (2006) Review of genetic parameters estimated at stallion and young horse performance tests and their correlations with later results in dressage and show-jumping competition. *Livestock Science* vol. 103, p. 1-12. [<https://doi.org/10.1016/j.livsci.2006.01.004>]
- HODGSON, D.R. (2014) Thermoregulation. In McKeever, K.H., McGowan, C.M. (Éd.), *The Athletic Horse*, 2e éd. St. Louis, W.B. Saunders, p. 108-124. [<https://doi.org/10.1016/B978-0-7216-0075-8.00017-4>]
- IFCE (2023) Base de données Info chevaux. In IFCE. [<https://infochevaux.ifce.fr/fr/info-chevaux>] (consulté le 08/11/2023).
- IFCE (2016) Outils de simulation: Estimation de la note d'état corporel. In IFCE. [<https://simulation.ifce.fr/noteetatcorporel>] (consulté le 07/11/2023).
- INSTITUT DE L'ÉLEVAGE (1997) Notation de l'état corporel des chevaux de selle et de sport, Paris : Institut de l'élevage.
- JANCZAREK, I., WILK, I., STRZELEC, K. (2017) Correlations between body dimensions of young trotters and motion parameters and racing performance. *Pferdeheilkunde Equine Medicine* vol. 33, p. 139-145. [<https://doi.org/10.21836/PEM20170205>]
- KAKAMU, T., WADA, K., SMITH, D.R., *et al.* (2017) Preventing heat illness in the anticipated hot climate of the Tokyo 2020 Summer Olympic Games. *Environmental Health and Preventive Medicine* vol. 22, n° 1, p. 68. [<https://doi.org/10.1186/s12199-017-0675-y>]
- KANG, H., ZSOLDOS, R.R., SOLE-GUITART, A., *et al.* (2023) Heat stress in horses: a literature review. *International Journal of Biometeorology* vol. 67, n° 6, p. 957-973. [<https://doi.org/10.1007/s00484-023-02467-7>]
- KINNUNEN, S., LAUKKANEN, R., HALDI, J., *et al.* (2006) Heart rate variability in trotters during different training periods. *Equine Veterinary Journal. Suppl.* 36, p. 214-217. [<https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.2006.tb05542.x>]
- KLEIBER, M. (1961) Metabolic rate and food utilization as a function of body size - Bordy Memorial Lecture I. *Research Bulletin* vol. 767, p. 3-25.
- LANGLOIS, B., BLOUIN, C., TAVERNIER, A. (1996) Nouveaux résultats d'estimation de l'héritabilité des gains en course des pur-sang en France. *Genetics Selection Evolution* vol. 28, n° 3, p. 275. [<https://doi.org/10.1186/1297-9686-28-3-275>]
- LANGLOIS, B., FROIDEVAUX, J., LAMARCHE, L., *et al.* (1978) Analyse des liaisons entre la morphologie et l'aptitude au galop au trot et au saut d'obstacles chez le cheval. *Annales de Génétique et de Sélection Animale* vol. 10, n° 3, p. 443-474. [<https://doi.org/10.1186/1297-9686-10-3-443>]
- LANGLOIS, B., POIREL, D., TASTU, D., *et al.* (1975) Analyse statistique et génétique des gains des pur sang anglais de trois ans dans les courses plates françaises. *Annales de Génétique et de Sélection Animale* vol. 7, n° 4, p. 387-408. [<https://doi.org/10.1186/1297-9686-7-4-387>]
- LANSADE, L. (2021) Tempérament et utilisation du cheval. In IFCE. [<https://equipedia.ifce.fr/sante-et-bien-etre-animal/bien-etre-et-comportement-animal/temperament/temperament-et-utilisation-du-cheval>] (consulté le 25/09/2023).
- LARSSON, J., PILBORG, P.H., JOHANSEN, M., *et al.* (2013) Physiological Parameters of Endurance Horses Pre- Compared to Post-Race, Correlated with Performance: A Two Race Study from Scandinavia. *ISRN Veterinary Science* vol. 2013, p. 684353. [<https://doi.org/10.1155/2013/684353>]
- LATHAM, C.M., OWEN, R.N., DICKSON, E.C., *et al.* (2021) Skeletal Muscle Adaptations to Exercise Training in Young and Aged Horses. *Frontiers in Aging* vol. 2, p. 708918. [<https://doi.org/10.3389/fragi.2021.708918>]
- LAWRENCE, L., JACKSON, S., KLINE, K., *et al.* (1992) Observations on body weight and condition of horses in a 150-mile endurance ride. *Journal of Equine Veterinary Science* vol. 12, n° 5, p. 320-324. [[https://doi.org/10.1016/S0737-0806\(06\)81345-6](https://doi.org/10.1016/S0737-0806(06)81345-6)]

- LEGG, K.A., WESTON, J.F., GEE, E.K., *et al.* (2019) Characteristics of Endurance Competitions and Risk Factors for Elimination in New Zealand during Six Seasons of Competition (2010/11–2015/16). *Animals* vol. 9, n° 9, p. 611. [<https://doi.org/10.3390/ani9090611>]
- LENOIR, C. (2003) Les défauts d'aplombs du cheval : origine, conséquences et possibilités de traitement - Synthèse bibliographique. Thèse de doctorat vétérinaire. Ecole nationale vétérinaire de Toulouse.
- LI, G., LEE, P., MORI, N., *et al.* (2012) Long term intensive exercise training leads to a higher plasma malate/lactate dehydrogenase (M/L) ratio and increased level of lipid mobilization in horses. *Veterinary Research Communications* vol. 36, n° 2, p. 149-155. [<https://doi.org/10.1007/s11259-012-9515-0>]
- LIENHART, H. (2016) Prise en charge thérapeutique du cheval d'endurance en compétition. Thèse de doctorat vétérinaire. Ecole nationale vétérinaire de Lyon.
- LISBOA, B.R.F., DA SILVA, J.A.R., DA SILVA, W.C., *et al.* (2023) Evaluation of thermoregulation of horses (*Equus caballus*) submitted to two methods of post-exercise cooling, in hot and humid climate conditions, in the Eastern Amazon. *Frontiers in Veterinary Science* vol. 10, p. 1150763. [<https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1150763>]
- LOPEZ-RIVERO, J.L., MORALES-LOPEZ, J.L., GALISTEO, A.M., *et al.* (1991) Muscle fibre type composition in untrained and endurance-trained Andalusian and Arab horses. *Equine Veterinary Journal* vol. 23, n° 2, p. 91-93. [<https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.1991.tb02727.x>]
- LUCK, M., LE MOYEC, L., BARREY, E., *et al.* (2015) Energetics of endurance exercise in young horses determined by nuclear magnetic resonance metabolomics. *Frontiers in Physiology* vol. 6, n° 198, p. 1-12. [<https://doi.org/10.3389/fphys.2015.00198>]
- LUSH, J.L. (1949) Heritability of Quantitative Characters in Farm Animals. *Hereditas* vol. 35, n° S1, p. 356-375. [<https://doi.org/10.1111/j.1601-5223.1949.tb03347.x>]
- MACH, N., MOROLDO, M., RAU, A., *et al.* (2021) Understanding the Holobiont : Crosstalk Between Gut Microbiota and Mitochondria During Long Exercise in Horse. *Frontiers in Molecular Biosciences* vol. 8, n° 656204. [<https://doi.org/10.3389/fmolb.2021.656204>]
- MACHMOUM, M., MEZROUR, L., BOUJENANE, I., *et al.* (2019) Morphologie comparative des chevaux arabes de lignées Égyptienne, Polonaise et Desert breed. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires* vol. 7, n° 1, p. 158-166.
- MARLIN, D.J., FENN, K., SMITH, N., *et al.* (2002) Changes in circulatory antioxidant status in horses during prolonged exercise. *The Journal of Nutrition* vol. 132, n° 6 Suppl 2, p. 1622S-7S. [<https://doi.org/10.1093/jn/132.6.1622S>]
- MCBRIDE, S.D., MILLS, D.S. (2012) Psychological factors affecting equine performance. *BMC Veterinary Research* vol. 8, n° 1, p. 180. [<https://doi.org/10.1186/1746-6148-8-180>]
- MCKEEVER, K.H., EATON, T.L., GEISER, S., *et al.* (2010) Age related decreases in thermoregulation and cardiovascular function in horses. *Equine Veterinary Journal* vol. 42, Suppl. 38, p. 220-227. [<https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.2010.00259.x>]
- MCMIKEN, D.F. (1983) An energetic basis of equine performance. *Equine Veterinary Journal* vol. 15, n° 2, p. 123-133. [<https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.1983.tb01734.x>]
- MÉTAYER, N., BIAU, S., COCHET, J.L., *et al.* (2004) Etude des facteurs locomoteurs et morphologiques de la performance du cheval d'endurance. Présenté à la 30e Journée de la Recherche Equine, Paris, 3 Mars, p. 67-77.
- MIRANDA, M.C.P.C., QUEIROZ-NETO, A., SILVA-JÚNIOR, J.R., *et al.* (2014) Comparison of the lactate minimum speed and the maximal lactate steady state to determine aerobic capacity in purebred Arabian horses. *New Zealand Veterinary Journal* vol. 62, n° 1, p. 15-20. [<https://doi.org/10.1080/00480169.2013.815103>]
- MISHEFF, M., ALEXANDER, G., HIRST, G. (2010) Management of fractures in endurance horses. *Equine Veterinary Education* vol. 22, p. 623-630. [<https://doi.org/10.1111/j.2042-3292.2010.00150.x>]
- MOSTAFA, M.B., ELEMMAWY, Y.M. (2020) Relationships between morphometric measurements and musculoskeletal disorders in jumping Thoroughbred horses. *Journal of Equine Science* vol. 31, n° 2, p. 23-27. [<https://doi.org/10.1294/jes.31.23>]

- MYĆKA, G., ROPKA-MOLIK, K., CYWIŃSKA, A., *et al.* (2023) Molecular insights into the lipid-carbohydrates metabolism switch under the endurance effort in Arabian horses. *Equine Veterinary Journal* vol. n/a, n° n/a. [<https://doi.org/10.1111/evj.13984>]
- NAGY, A., MURRAY, J.K., DYSON, S.J. (2014a) Descriptive epidemiology and risk factors for eliminations from Fédération Equestre Internationale endurance rides due to lameness and metabolic reasons (2008–2011). *Equine Veterinary Journal* vol. 46, n° 1, p. 38-44. [<https://doi.org/10.1111/evj.12069>]
- NAGY, A., MURRAY, J.K., DYSON, S.J. (2014b) Horse-, rider-, venue- and environment-related risk factors for elimination from Fédération Equestre Internationale endurance rides due to lameness and metabolic reasons. *Equine Veterinary Journal* vol. 46, n° 3, p. 294-299. [<https://doi.org/10.1111/evj.12170>]
- NIELSEN, B.D., TURNER, K.K., VENTURA, B.A., *et al.* (2006) Racing speeds of Quarter Horses, Thoroughbreds and Arabians. *Equine Veterinary Journal* vol. 38, Suppl. 36, p. 128-132. [<https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.2006.tb05528.x>]
- OLDHAM, S.L., POTTER, G.D., EVANS, J.W., *et al.* (1990) Storage and mobilization of muscle glycogen in exercising horses fed a fat-supplemented diet. *Journal of Equine Veterinary Science* vol. 10, n° 5, p. 353-359. [[https://doi.org/10.1016/S0737-0806\(06\)80096-1](https://doi.org/10.1016/S0737-0806(06)80096-1)]
- ONAR, V., KAHVECIOĞLU, O., ERDIKMEN, D., *et al.* (2018) The estimation of withers height of ancient horse : New estimation formulations by using the metacarpal measurements of living horse. *Revue de Médecine Vétérinaire* vol. 169, p. 157-165.
- PAKULA, P., HALAMA, A., AL-DOUS, E., *et al.* (2023) Characterization of exercise-induced hemolysis in endurance horses. *Frontiers in Veterinary Science* vol. 10. [<https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1115776>]
- PARIS, A., BECCATI, F., PEPE, M. (2021) Type, prevalence, and risk factors for the development of orthopedic injuries in endurance horses during training and competition. *Journal of the American Veterinary Medical Association* vol. 258, n° 10, p. 1109-1118. [<https://doi.org/10.2460/javma.258.10.1109>]
- PFAU, T., SPENCE, A., STARKE, S., *et al.* (2009) Modern Riding Style Improves Horse Racing Times. *Science* vol. 325, n° 5938, p. 289-289. [<https://doi.org/10.1126/science.1174605>]
- RANKINS, E.M., WICKENS, C.L. (2020) A systematic review of equine personality. *Applied Animal Behaviour Science* vol. 231, p. 105076. [<https://doi.org/10.1016/j.applanim.2020.105076>]
- RAYMOND, C., MATTHEWS, T., HORTON, R.M. (2020) The emergence of heat and humidity too severe for human tolerance. *Science Advances* vol. 6, n° 19, p. eaaw1838. [<https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw1838>]
- RICARD, A. (2010) L'amélioration génétique des chevaux. Diplôme HRD. Institut National Polytechnique de Toulouse. [<https://hal.inrae.fr/tel-02817234/document>]
- RICARD, A., DANVY, S., SABBAGH, M. (2021) Les indices chevaux : CSO, CCE et dressage. In *IFCE*. [<https://equipedia.ifce.fr/elevage-et-entretien/elevage/selection-et-indices/les-indices-chevaux-cso-cce-et-dressage>] (consulté le 20/09/2023).
- RICARD, A., DUMONT SAINT PRIEST, B., CHASSIER, M., *et al.* (2020a) Genetic consistency between gait analysis by accelerometry and evaluation scores at breeding shows for the selection of jumping competition horses. *PLoS One* vol. 15, n° 12, p. e0244064. [<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0244064>]
- RICARD, A., DUMONT SAINT PRIEST, B., DANVY, S., *et al.* (2020b) Accelerometers Provide Early Genetic Selection Criteria for Jumping Horses. *Frontiers in Genetics* vol. 11, n° 448. [<https://doi.org/10.3389/fgene.2020.00448>]
- RICARD, A., TOUVAIS, M. (2007) Genetic parameters of performance traits in horse endurance races. *Livestock Science* vol. 110, n° 1-2, p. 118-125. [<https://doi.org/10.1016/j.livsci.2006.10.008>]
- RIPOLLÉS-LOBO, M., PERDOMO-GONZÁLEZ, D.I., SÁNCHEZ-GUERRERO, M.J., *et al.* (2022) Genetic relationship between free movement and under rider gaits in young Pura Raza Española horses. *Livestock Science* vol. 263, p. 105031. [<https://doi.org/10.1016/j.livsci.2022.105031>]

- RIVERO, J.-L.L., HILL, E.W. (2016) Skeletal muscle adaptations and muscle genomics of performance horses. *The Veterinary Journal* vol. 209, p. 5-13. [https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2015.11.019]
- RIVERO, J.L.L., SERRANO, A.L., QUIROZ-ROTHER, E., *et al.* (2001) Coordinated changes of kinematics and muscle fibre properties with prolonged endurance training. *Equine Veterinary Journal* vol. 33, n° S33, p. 104-108. [https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.2001.tb05370.x]
- ROBERT, C. (2019) Entraînement du cheval d'endurance et bien-être. Webconférence. *In IFCE*. [https://www.ifce.fr/ifce/connaissances/webconferences/equitation/entrainement-du-cheval-d-endurance-et-bien-etre/] (consulté le 28/08/2023).
- ROBIN, N. (2004) Contribution à l'étude du cheval pur-sang arabe. Thèse de doctorat vétérinaire. Ecole nationale vétérinaire de Toulouse.
- ROCHE, C. (2022) L'Occident découvre le cheval arabe | Patrimoines Partagés - Bibliothèques d'Orient. *Bibliothèques d'Orient*. [https://heritage.bnf.fr/bibliothequesorient/fr/occident-cheval-arabe-article] (consulté le 15/11/2023).
- ROUSH, M. (2011) What's the Ideal Endurance Horse Conformation? Interview. *In Practical Horseman*. [https://practicalhorsemanmag.com/health/whats-the-ideal-endurance-horse-conformation/] (consulté le 21/11/2023).
- SABBAGH, M., DANVY, S., DEPUILLE, C. (2017) Les indices en endurance. *In IFCE*. [https://equipedia.ifce.fr/elevage-et-entretien/elevage/selection-et-indices/les-indices-en-endurance] (consulté le 13/09/2023).
- SANTOS, M.M., BENVENUTO, G.V., RAMOS, G.V., *et al.* (2022) Effect of Lactate Minimum Speed-Guided Conditioning on Selected Blood Parameters of Horses. *Journal of Equine Veterinary Science* vol. 119, p. 104133. [https://doi.org/10.1016/j.jevs.2022.104133]
- SAPONE, M., MARTIN, P., BEN MANSOUR, K., *et al.* (2021) The Protraction and Retraction Angles of Horse Limbs: An Estimation during Trotting Using Inertial Sensors. *Sensors* vol. 21, n° 11, p. 3792. [https://doi.org/10.3390/s21113792]
- SCOTTISH ENDURANCE RIDING CLUB (2023) Longevity Awards. *In Welcome to Scottish Endurance Riding Club*. [https://www.scottishendurance.com/Cms/Spaces/ATAA/Longevity+Awards] (consulté le 21/11/2023).
- SEIDLITZ, G., WILLEKE, H., VON BUTLER-WEMKEN, I. (1991) Kompermabe und Exterieurbeurteilungen bei Zuchtstuten des Arabischen Vollblutpferdes. *Archiv für Tierzucht* vol. 34, p. 233-240.
- SENEFELD, J.W., SHEPHERD, J.R.A., BAKER, S.E., *et al.* (2021) Sex-based limits to running speed in the human, horse and dog: the role of sexual dimorphisms. *FASEB Journal* vol. 35, n° 5, p. e21562. [https://doi.org/10.1096/fj.202100161R]
- SILVA, A.P.A., CURI, R.A., LANGLOIS, B., *et al.* (2014) Genetic parameters for earnings in Quarter Horse. *Genetics and Molecular Research* vol. 13, n° 3, p. 5840-5848. [https://doi.org/10.4238/2014.August.1.2]
- SMITH, A.M., STANIAR, W.B., SPLAN, R.K. (2006) Associations between yearling body measurements and career racing performance in Thoroughbred racehorses. *Journal of Equine Veterinary Science* vol. 26, n° 5, p. 212-214. [https://doi.org/10.1016/j.jevs.2006.03.002]
- SOBCZUK, D., KOMOSA, M. (2012) Morphological Differentiation of Polish Arabian Horses - Multivariate Analysis. *Bulletin of the Veterinary Institute in Pulawy* vol. 56. [https://doi.org/10.2478/v10213-012-0110-5]
- SUONTAMA, M., VAN DER WERF, J.H.J., JUGA, J., *et al.* (2012) Genetic correlations for foal and studbook traits with racing traits and implications for selection strategies in the Finnhorse and Standardbred trotter. *Journal of Animal Breeding and Genetics* vol. 130, n° 3, p. 178-189. [https://doi.org/10.1111/j.1439-0388.2012.01011.x]
- THIRUVENKADAN, A.K., KANDASAMY, N., PANNEERSELVAM, S. (2009) Inheritance of racing performance of trotter horses: An overview. *Livestock Science* vol. 124, n° 1, p. 163-181. [https://doi.org/10.1016/j.livsci.2009.01.010]
- TRACHSEL, D.S., GIRAUDET, A., MASO, D., *et al.* (2016) Relationships between body dimensions, body weight, age, gender, breed and echocardiographic dimensions in young endurance

- horses. *BMC Veterinary Research* vol. 12, p. 226. [<https://doi.org/10.1186/s12917-016-0846-x>]
- TRIBOUT, P. (2013) Étude morphométrique du cheval d'endurance de race Arabe et croisé Arabe en relation avec la performance. Thèse de doctorat vétérinaire. Ecole nationale vétérinaire d'Alfort.
- TRIGO, P., CASTEJON, F., RIBER, C., *et al.* (2010) Use of biochemical parameters to predict metabolic elimination in endurance rides. *Equine Veterinary Journal*. Suppl. 38, p. 142-146. [<https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.2010.00238.x>]
- TRIQUENAUX, M. (2015) Caractérisation de la morphologie du jeune cheval d'endurance (4 à 6 ans) - Contribution à la détermination de critères en relation avec la performance. Thèse de doctorat vétérinaire. Ecole nationale vétérinaire d'Alfort.
- TYLER, C.M., GOLLAND, L.C., EVANS, D.L., *et al.* (1998) Skeletal muscle adaptations to prolonged training, overtraining and detraining in horses. *Pflügers Archiv* vol. 436, n° 3, p. 391-397. [<https://doi.org/10.1007/s004240050648>]
- VALBERG, S.J. (2014) Muscle anatomy, physiology, and adaptations to exercise and training. In Hodgson, D.R., McKeever, K.H., McGowan, C.M. (Éd.), *The Athletic Horse: Principles and Practice of Equine Sports Medicine*, 2e éd., St. Louis, W.B. Saunders, p. 174-201.
- VAN DAMME, R., ENTIN, P., VANHOODYDONCK, B., *et al.* (2008) Causes of sexual dimorphism in performance traits: A comparative approach. *Evolutionary Ecology Research* vol. 10, n° 2, p. 229-250.
- VELIE, B.D., HAMILTON, N.A., WADE, C.M. (2015) Heritability of racing performance in the Australian Thoroughbred racing population. *Animal Genetics* vol. 46, n° 1, p. 23-29. [<https://doi.org/10.1111/age.12234>]
- VERDEGAAL, E.-L.J.M.M., HOWARTH, G.S., MCWHORTER, T.J., *et al.* (2021) Continuous Monitoring of the Thermoregulatory Response in Endurance Horses and Trotter Horses During Field Exercise: Baseline for Future Hot Weather Studies. *Frontiers in Physiology* vol. 12, p. 708737. [<https://doi.org/10.3389/fphys.2021.708737>]
- VIAL, C.-É. (2012) Les écuries de Napoléon : une parenthèse dans l'histoire de l'équitation ou la chance d'un renouveau ? *In Situ*. n° 18. [<https://doi.org/10.4000/insitu.9707>]
- VIDAMENT, M., LANSADE, L., DANVY, S., *et al.* (2021) Personality in young horses and ponies evaluated during breeding shows: Phenotypic link with jumping competition results. *Journal of Veterinary Behavior* vol. 44, p. 1-11. [<https://doi.org/10.1016/j.jveb.2020.09.003>]
- VIRY, S., SLEIMEN-MALKOUN, R., TEMPRADO, J.-J., *et al.* (2013) Patterns of Horse-Rider Coordination during Endurance Race: A Dynamical System Approach. *PLoS One* vol. 8, n° 8, p. e71804. [<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0071804>]
- WITKOWSKA-PIŁASZEWICZ, O., BAŚKA, P., CZOPOWICZ, M., *et al.* (2019) Anti-Inflammatory State in Arabian Horses Introduced to the Endurance Training. *Animals* vol. 9, n° 9, p. 616. [<https://doi.org/10.3390/ani9090616>]
- WOLTER, R. (1996) Aptitudes sportives et nutrition du cheval. *Bulletin des GTV* vol. 5, p. 75-83.
- YOUNES, M., ROBERT, C., COTTIN, F., *et al.* (2015) Speed and Cardiac Recovery Variables Predict the Probability of Elimination in Equine Endurance Events. *PLoS One* vol. 10, n° 8, p. e0137013. [<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0137013>]
- YOUNES, M., ROBERT, C., COTTIN, F., *et al.* (2014) Genetic Component of Endurance Ability. *Equine Veterinary Journal* vol. 46, Suppl. 46, p. 15. [https://doi.org/10.1111/evj.12267_46]
- ZSOLDOS, R.R., LICKA, T.F. (2015) The equine neck and its function during movement and locomotion. *Zoology* vol. 118, n° 5, p. 364-376. [<https://doi.org/10.1016/j.zool.2015.03.005>]
- ZUFFA, T., BENNET, E.D., PARKIN, T.D.H. (2022) Factors associated with completion of Fédération Équestre Internationale endurance rides (2012–2019): Modelling success to promote welfare-oriented decisions in the equestrian sport of endurance. *Preventive Veterinary Medicine* vol. 198, p. 105534. [<https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2021.105534>]
-

Annexe 1 : Grille de notation SHF



ACA Concours d'Élevage Race Arabe Attentes par rapport au standard de race

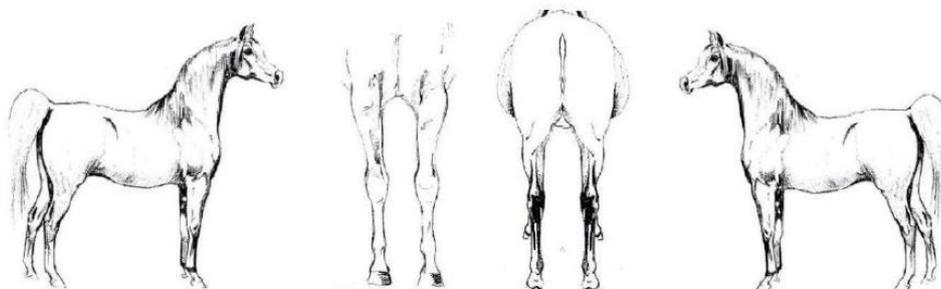
		Principales qualités	Principaux défauts	Note pondérée
1	TYPE (Coeff 3) Conformation Équilibre des parties Peau Robe et crins Port de queue	Cheval inscrit dans un carré 3 parties égales Bien pigmentée et fine Soyeux et fins Haut	Cheval inscrit dans un rectangle 3 parties disproportionnées Dépigmentée et/ou épaisse Trop épais – Piqués Bas	
2	TÊTE (Coeff 1)	En triangle vue de côté, en losange vue de face Courte, sèche, raffinée, profil plutôt concave Oreilles courtes et raffinées, Yeux gros, ronds, placés bas Naseaux larges, bout de nez petit et raffiné Auge large, gorge sèche, joue prononcée	Tête plate, vue de côté et étroite, vue de face Longue, grossière, droite ou convexe, Oreilles grossières, longues, Yeux petits, en amande, placés hauts Naseaux petits, bout de nez grossier Auge étroite, gorge épaisse, petite joue	
3	ENCOLURE (Coeff 1)	Longue, sèche, greffée haut Portée verticalement, attache tête-encolure Attachée harmonieusement avec le garrot Ligne du dessus arquée, ligne du dessous convexe Musculature puissante et harmonieuse	Courte, lourde, greffée bas Portée horizontalement, attache formant un angle avec la tête Attachée irrégulièrement avec le garrot (coup de hache) Ligne du dessus droite ou concave, ligne du dessous concave Musculature pauvre et/ou épaisse	
4	EPAULE ET BRAS (Coeff 1)	Longue, bien oblique (45°) Angle épaule-bras bien ouvert (90°) Bras long et oblique	Epaule courte, droite Angle épaule-bras fermé Bras court et/ou horizontal	
5	THORAX (Coeff 1)	Côtes cintrées Poitrail large sans excès Poitrine profonde Flanc profond	Côtes plates Poitrail trop étroit et/ou trop large Poitrine peu profonde Cheval levretté	
6	LIGNE DE DESSUS (Coeff 1)	Garrot moyennement sorti, prolongé sur le dos Transition garrot-dos fluide Dos court, tendu et fort Rein court, large et bien attaché	Garrot noyé ou tranchant, court Transition garrot-dos abrupte Dos long, faible, concave Rein long, mou ou mal attaché	
7	CROUPE, BASSIN, CUISSE (Coeff 1)	Croupe longue, ligne du dessus horizontale Axe pointe de la hanche pointe de la fesse oblique Attache de queue haute Cuisse bien descendue	Croupe courte, en pupitre, avalée, tranchante Axe pointe de la hanche pointe de la fesse horizontal ou trop oblique Attache de queue basse Cuisse plate ou trop musculieuse	
8	ARTICULATIONS TENDONS (Coeff 1)	Larges, fortes, sèches et nettes Secs	Très légères ou trop lourdes, porteuses de tares Engorgés, déformés	
9	APLOMBS ANTERIEURS (Coeff 1)	Droits Avant-bras longs Genoux en place, larges et plats Canons : courts, circonférence : 18 cm Pâturons = $\frac{1}{2}$ L canon < L pâturon < $\frac{3}{4}$ L canon Angle des pâturons : 45° et parallèle à l'inclinaison de l'épaule Boulets secs, nets et bien dessinés	Cagneux ou panards à partir du genou ou du boulet Cheval campé ou sous lui Avant-bras courts Genoux creux, en pied de banc, de bœuf ou cambrés Canons trop longs, trop fins ou trop épais Pâturons trop longs ou trop courts Angle des pâturons : trop incliné ou trop droit Boulets déformés, petits boulets	

10	APLOMBS POSTERIEURS (Coeff 1)	Droits Fémur long Jarrets bas Angle des paturons +/-50 °	Cagneux ou panards à partir du jarret ou du boulet Cheval campé ou sous lui Fémur court Jarrets droits, coudés, clos ou cambrés Angle des paturons : trop incliné ou trop droit	
11	PIEDS (Coeff 1)	Pieds symétriques, ronds et proportionnés à la masse avec talons normaux Axe des pieds droit	Pieds asymétriques, trop larges ou trop petits pour la masse, pied(s) bot (s), talons trop hauts ou trop plats Axe des pieds brisé	
12	PAS (Coeff 1) Amplitude Engagement des postérieurs Souplesse, fluidité Tonicité Régularité Impulsion Rectitude Engagement/Souplesse/ Fluidité Amplitude	Légèreté, Cheval en équilibre cadence égale et régulière, quatre temps Mobilisation des muscles, énergie, impulsion puissante Poussée puissante de l'arrière-main Deux pistes parallèles équidistantes Cheval qui se méjuge, Allure déliée, utilisation souple de tout le corps Foulée longue	Lourdeur, Cheval sur les épaules, cadence irrégulière, dissymétrie Foulées et cadence inégales ou irrégulières Manque d'impulsion Une ou trois pistes, pistes convergentes Cheval qui se juge ou se déjuge Cheval raide Foulée courte	
13	TROT (Coeff 1) Impulsion Rectitude Engagement/Souplesse/ fluidité Amplitude	Légèreté, Cheval en équilibre, cadence égale et régulière, deux temps, symétrie parfaite des bipèdes latéraux Poussée puissante de l'arrière-main Deux pistes parallèles équidistantes Souplesse, Mouvement fluide et engagement des postérieurs Foulée longue	Lourdeur, Cheval sur les épaules, cadence irrégulière Dissymétrie, amble Manque d'impulsion Une ou trois pistes, pistes convergentes Mouvement piqué, décousu, sans engagement, raideur Foulée courte	
14	GALOP (Coeff 1) Rectitude Engagement/Souplesse/ fluidité Impulsion Amplitude	Cheval en équilibre, trois temps Poussée puissante de l'arrière-main Deux pistes parallèles équidistantes Souplesse, engagement et bascule de l'arrière-main, soutien du dos, transitions aisées Foulée longue	Lourdeur, cheval sur les épaules, galop désuni, traquenard ou aubin Manque d'impulsion Une ou trois pistes, pistes convergentes Cheval sur les épaules, cheval désengagé Manque d'équilibre, pas de soutien, transitions ardues, raideur Foulée courte	
15	COMPORTEMENT (Coeff 1)	Cheval attentif et collaboratif, réactif et réfléchi, calme en présence de ses congénères	Cheval agressif, indiscipliné, exagérément craintif, irrespectueux, hyperexcité par la présence d'autres chevaux ou leur absence	

Total sur 170 :

Total sur 100 :

- En cas d'ex-aequo : le cheval ayant la meilleure note de type l'emporte



Annexe 2 : Corrélations avec les quatre indices de performance

Tableau 32 – Annexe 2-A : Résultats des tests des corrélations de Pearson ou Spearman pour toutes les variables de morphologie chez les chevaux de 4 ans (n = 53)

	IRE		Vitesse		Classement		Distance	
	r	p	r	p	r	p	r	p
VARIABLES MORPHOLOGIQUES								
Hauteur au Garrot	0,22	0,12	0,11	0,42	0,28	0,043	0,25	0,08
Périmètre Thoracique	-0,08	0,58	-0,10	0,47	-0,01	0,93	0,05	0,70
Longueur Corporelle	0,11	0,43	0,08	0,56	0,14	0,30	0,10	0,47
Poids	0,14	0,33	0,10	0,50	0,19	0,20	0,13	0,36
NEC	0,06	0,66	0,04	0,80	0,08	0,56	0,06	0,68
<u>Pli Cutané</u>	<u>-0,06</u>	<u>0,72</u>	<u>-0,10</u>	<u>0,48</u>	<u>-0,01</u>	<u>0,94</u>	<u>0,05</u>	<u>0,71</u>
VARIABLES MORPHOMETRIQUES mesurées								
TAILLEC	-0,14	0,32	-0,06	0,68	-0,17	0,23	-0,20	0,16
VIDESST	0,17	0,25	0,10	0,49	0,20	0,16	0,18	0,20
THORAX	0,08	0,59	0,08	0,60	0,06	0,69	0,070	0,63
TETE	0,03	0,83	-0,13	0,38	0,13	0,35	0,17	0,23
ENCOLURE	0,26	0,07	0,11	0,46	0,34	0,014	0,34	0,015
LONGUEUR	0,02	0,89	0,11	0,45	-0,03	0,83	-0,08	0,60
LONGUEURtot	-0,10	0,47	-0,04	0,78	-0,12	0,40	-0,15	0,28
<u>IEPAULEPOINTEHANCHE</u>	<u>0,08</u>	<u>0,57</u>	<u>0,06</u>	<u>0,66</u>	<u>0,05</u>	<u>0,72</u>	<u>0,10</u>	<u>0,48</u>
<u>ICOUDEGRASSET</u>	<u>-0,12</u>	<u>0,41</u>	<u>-0,16</u>	<u>0,26</u>	<u>-0,09</u>	<u>0,55</u>	<u>-0,09</u>	<u>0,55</u>
DOSAV	0,08	0,58	0,18	0,22	-0,0003	0,99	-0,03	0,84
DOSARR	-0,18	0,21	-0,15	0,31	-0,15	0,30	-0,19	0,17
ADOS	-0,07	0,61	-0,16	0,26	0,03	0,84	-0,003	0,98
HGARROT	0,19	0,18	0,25	0,08	0,11	0,43	0,11	0,45
IGARROT	0,13	0,37	0,12	0,40	0,11	0,45	0,12	0,42
Segments								
SCAPULA	0,09	0,54	0,13	0,36	0,07	0,61	0,01	0,92
HUMERUS	0,17	0,24	0,20	0,17	0,14	0,32	0,14	0,34
RADIUS	0,15	0,28	0,04	0,81	0,22	0,11	0,23	0,10
<u>METACARPE</u>	<u>-0,02</u>	<u>0,90</u>	<u>0,06</u>	<u>0,40</u>	<u>-0,02</u>	<u>0,87</u>	<u>-0,02</u>	<u>0,87</u>
PHALANGEA	-0,11	0,46	-0,02	0,88	-0,15	0,29	-0,16	0,27
Angles et inclinaisons	-0,14	0,32	-0,20	0,16	-0,09	0,54	-0,05	0,72

IEPAULE								
<u>IHUMERUS</u>	<u>0,06</u>	<u>0,66</u>	<u>0,09</u>	<u>0,53</u>	<u>0,01</u>	<u>0,96</u>	<u>0,01</u>	<u>0,97</u>
AEPAULE	- 0,09	0,52	- 0,12	0,41	- 0,08	0,57	- 0,05	0,71
ACOUDE	0,19	0,18	0,20	0,15	0,15	0,31	0,14	0,32
AGENOUE	- 0,07	0,63	- 0,05	0,73	- 0,08	0,56	-0,07	0,62
Segments								
COXAE	0,08	0,58	0,18	0,21	0,008	0,96	- 0,03	0,81
SACRE	0,14	0,32	0,19	0,19	0,07	0,63	0,10	0,49
FEMUR	-0,005	0,97	0,11	0,43	- 0,07	0,60	- 0,13	0,38
TIBIA	0,01	0,92	0,03	0,86	0,008	0,95	0,009	0,95
METATARSE	0,01	0,94	0,04	0,76	- 0,02	0,88	- 0,03	0,86
PHALANGEP	- 0,12	0,42	- 0,10	0,49	- 0,10	0,50	- 0,12	0,41
Angles et inclinaisons								
IBASSIN	-0,02	0,92	-0,12	0,40	0,07	0,65	0,09	0,53
IFEMUR	-0,23	0,10	-0,23	0,10	-0,20	0,16	-0,20	0,16
AHANCHE	-0,17	0,25	-0,25	0,08	-0,07	0,62	-0,06	0,67
AGRASSET	-0,10	0,47	-0,13	0,36	-0,07	0,62	-0,07	0,65
AJARRET	-0,16	0,28	-0,13	0,38	-0,17	0,23	-0,14	0,33

VARIABLES MORPHOMETRIQUES calculées

<u>IC_{PROFIL}</u>	<u>-0,08</u>	<u>0,58</u>	<u>- 0,09</u>	<u>0,53</u>	<u>-0,05</u>	<u>0,75</u>	<u>-0,01</u>	<u>0,91</u>
<u>IC_{COMPACITE}</u>	<u>-0,08</u>	<u>0,57</u>	<u>-0,08</u>	<u>0,57</u>	<u>-0,08</u>	<u>0,57</u>	<u>-0,07</u>	<u>0,63</u>
<u>IC_{RELATIF}</u>	-0,20	0,16	-0,18	0,19	-0,17	0,21	-0,17	0,24
S _{HODGSON}	0,14	0,33	0,10	0,50	0,19	0,20	0,13	0,36
S _{BRODY}	0,14	0,34	0,09	0,52	0,18	0,20	0,13	0,38
IS _{HODGSON}	0,12	0,39	0,08	0,56	0,17	0,23	0,11	0,43
IS _{BRODY}	0,13	0,35	0,09	0,53	0,18	0,21	0,12	0,39
HG/TAILLEC	0,32	0,02	0,17	0,24	0,37	0,007	0,39	0,004
Membre antérieur								
RADIUS/METACARPE	0,11	0,44	0,06	0,70	0,14	0,31	0,14	0,32
RADIUS/HG	0,08	0,56	-0,02	0,91	0,15	0,31	0,16	0,25
THORAX/HG	-0,05	0,73	-0,01	0,93	-0,09	0,55	-0,06	0,67
Triangle postérieur								
<u>GRASSETPTEHANCHE</u>	<u>- 0,01</u>	<u>0,94</u>	<u>0,06</u>	<u>0,72</u>	<u>- 0,08</u>	<u>0,64</u>	<u>- 0,09</u>	<u>0,60</u>
COXAE/FEMUR	0,11	0,44	0,11	0,43	0,10	0,49	0,10	0,50
<u>COXAE/GRASSETPTEHANCHE</u>	<u>0,01</u>	<u>0,94</u>	<u>- 0,04</u>	<u>0,80</u>	<u>0,10</u>	<u>0,56</u>	<u>0,06</u>	<u>0,72</u>
<u>FEMUR/GRASSETPTEHANCHE</u>	<u>- 0,04</u>	<u>0,83</u>	<u>- 0,007</u>	<u>0,97</u>	<u>0,10</u>	<u>0,55</u>	<u>0,08</u>	<u>0,65</u>

IRE = Indice en Raid d'Endurance ; r = coefficient de corrélation ; p = p-value

Tableau 33 - Annexe 2-B : Résultats des tests des corrélations de Pearson ou Spearman pour toutes les variables de morphologie chez les chevaux de 5 ans (n = 100)

	IRE		Vitesse		Classement		Distance	
	r	p	r	p	r	p	r	p
VARIABLES MORPHOLOGIQUES								
Hauteur au Garrot	0,14	0,18	0,10	0,33	0,14	0,16	0,14	0,16
Périmètre Thoracique	0,14	0,15	0,05	0,56	0,16	0,11	0,20	0,048
Longueur Corporelle	0,16	0,12	0,12	0,22	0,15	0,13	0,16	0,12
Poids	0,19	0,06	0,14	0,17	0,19	0,07	0,21	0,046
NEC	0,14	0,16	0,11	0,27	0,15	0,14	0,12	0,23
<u>Pli Cutané</u>	<u>0,09</u>	<u>0,35</u>	<u>0,12</u>	<u>0,22</u>	<u>0,06</u>	<u>0,53</u>	<u>0,03</u>	<u>0,73</u>
VARIABLES MORPHOMETRIQUES mesurées								
TAILLEC	0,10	0,35	0,02	0,86	0,12	0,24	0,15	0,14
VIDESST	0,11	0,31	0,05	0,63	0,134	0,19	0,13	0,22
THORAX	0,08	0,45	0,08	0,43	0,06	0,54	0,07	0,52
TETE	0,11	0,29	0,08	0,42	0,11	0,28	0,11	0,28
ENCOLURE	0,05	0,65	0,10	0,33	0,006	0,95	-0,007	0,95
LONGUEUR	0,02	0,88	0,005	0,96	0,006	0,96	0,03	0,75
LONGUEURtot	0,06	0,57	0,04	0,70	0,05	0,62	0,07	0,50
<u>IEPAULEPOINTEHANCHE</u>	<u>-0,007</u>	<u>0,95</u>	<u>-0,01</u>	<u>0,90</u>	<u>-0,003</u>	<u>0,97</u>	<u>0,02</u>	<u>0,83</u>
<u>ICOUDEGRASSET</u>	<u>0,13</u>	<u>0,21</u>	<u>0,11</u>	<u>0,28</u>	<u>0,12</u>	<u>0,25</u>	<u>0,12</u>	<u>0,23</u>
DOSAV	-0,15	0,14	-0,11	0,29	-0,14	0,16	-0,16	0,12
DOSARR	0,18	0,09	0,09	0,38	0,19	0,06	0,21	0,04
ADOS	0,04	0,69	0,07	0,48	0,007	0,94	0,009	0,93
HGARROT	-0,09	0,38	-0,09	0,38	-0,05	0,63	-0,09	0,40
IGARROT	0,03	0,77	0,01	0,93	0,05	0,62	0,04	0,72
Segments								
SCAPULA	0,13	0,19	0,09	0,40	0,14	0,18	0,15	0,15
HUMERUS	-0,12	0,26	-0,09	0,40	-0,09	0,40	-0,12	0,23
RADIUS	0,10	0,31	-0,006	0,95	0,16	0,11	0,16	0,11
<u>METACARPE</u>	<u>0,04</u>	<u>0,71</u>	<u>0,17</u>	<u>0,10</u>	<u>-0,05</u>	<u>0,66</u>	<u>-0,09</u>	<u>0,40</u>
PHALANGEA	-0,006	0,95	-0,05	0,63	0,03	0,78	0,03	0,76
Angles et inclinaisons								
IEPAULE	0,11	0,30	0,15	0,14	0,06	0,54	0,05	0,66
<u>IHUMERUS</u>	<u>-0,09</u>	<u>0,40</u>	<u>-0,08</u>	<u>0,48</u>	<u>-0,12</u>	<u>0,26</u>	<u>-0,09</u>	<u>0,36</u>
AEPAULE	-0,04	0,67	0,03	0,79	-0,10	0,31	-0,07	0,47
ACOUDE	0,08	0,44	0,05	0,65	0,07	0,47	0,10	0,34
AGENOUE	0,10	0,33	0,05	0,62	0,11	0,29	0,11	0,27

Segments									
COXAE	-0,03	0,76	-0,03	0,77	-0,04	0,69	-0,02	0,88	
SACRE	- 0,06	0,58	0,005	0,96	- 0,09	0,38	- 0,08	0,42	
FEMUR	0,10	0,32	0,08	0,45	0,09	0,39	0,11	0,28	
TIBIA	- 0,09	0,39	- 0,13	0,19	- 0,06	0,53	- 0,02	0,87	
METATARSE	0,18	0,08	0,18	0,08	0,16	0,13	0,14	0,16	
PHALANGEP	0,10	0,32	0,04	0,71	0,13	0,22	0,14	0,17	
Angles et inclinaisons									
IBASSIN	0,05	0,66	0,08	0,45	0,01	0,91	0,02	0,84	
IFEMUR	0,02	0,83	0,02	0,85	0,02	0,83	0,01	0,92	
AHANCHE	0,06	0,56	0,08	0,45	0,04	0,70	0,03	0,76	
AGRASSET	- 0,03	0,75	- 0,02	0,80	-0,006	0,95	- 0,05	0,63	
AJARRET	- 0,11	0,26	- 0,09	0,39	-0,08	0,45	- 0,13	0,20	

VARIABLES MORPHOMETRIQUES calculées

<u>IC_{PROFIL}</u>	<u>- 0,12</u>	<u>0,25</u>	<u>- 0,13</u>	<u>0,20</u>	<u>- 0,10</u>	<u>0,29</u>	<u>- 0,11</u>	<u>0,26</u>	
<u>IC_{COMPACITE}</u>	<u>- 0,16</u>	<u>0,12</u>	<u>- 0,14</u>	<u>0,18</u>	<u>- 0,14</u>	<u>0,17</u>	<u>- 0,17</u>	<u>0,10</u>	
<u>IC_{RELATIF}</u>	- 0,07	0,47	- 0,11	0,29	- 0,05	0,62	- 0,02	0,82	
<u>S_{HODGSON}</u>	0,19	0,06	0,14	0,17	0,19	0,07	0,20	0,047	
<u>S_{BRODY}</u>	0,19	0,06	0,14	0,17	0,19	0,07	0,21	0,044	
<u>IS_{HODGSON}</u>	0,20	0,06	0,14	0,18	0,19	0,07	0,21	0,041	
<u>IS_{BRODY}</u>	0,19	0,06	0,14	0,18	0,19	0,07	0,21	0,043	
HG/TAILLEC	-0,02	0,82	0,02	0,79	-0,03	0,76	-0,07	0,49	
Membre antérieur									
RADIUS/METACARPE	0,02	0,87	- 0,10	0,34	0,09	0,36	0,10	0,34	
RADIUS/HG	0,04	0,70	- 0,06	0,55	0,10	0,31	0,10	0,32	
THORAX/HG	-0,04	0,70	- 0,005	0,96	- 0,06	0,55	- 0,05	0,60	
Triangle postérieur									
<u>GRASSETPTEHANCHE</u>	<u>0,11</u>	<u>0,31</u>	<u>0,004</u>	<u>0,97</u>	<u>0,13</u>	<u>0,25</u>	<u>0,10</u>	<u>0,35</u>	
COXAE/FEMUR	- 0,11	0,27	- 0,09	0,38	- 0,12	0,26	- 0,10	0,31	
<u>COXAE/GRASSETPTEHANCHE</u>	<u>- 0,18</u>	<u>0,11</u>	<u>- 0,09</u>	<u>0,42</u>	<u>- 0,17</u>	<u>0,13</u>	<u>- 0,14</u>	<u>0,19</u>	
<u>FEMUR/GRASSETPTEHANCHE</u>	<u>0,05</u>	<u>0,62</u>	<u>0,02</u>	<u>0,85</u>	<u>- 0,08</u>	<u>0,49</u>	<u>- 0,05</u>	<u>0,67</u>	

IRE = Indice en Raid d'Endurance ; r = coefficient de corrélation ; p = p-value

Tableau 34 - Annexe 2-C : Résultats des tests des corrélations de Pearson ou Spearman pour toutes les variables de morphologie chez les chevaux de 6 ans (n = 174)

	IRE		Vitesse		Classement		Distance	
	r	p	r	p	r	p	r	p
VARIABLES MORPHOLOGIQUES								
Hauteur au Garrot	0,18	0,02	0,214 3	0,005	0,12	0,11	0,13	0,08
Périmètre Thoracique	0,09	0,25	0,12	0,12	0,04	0,58	0,06	0,44
Longueur Corporelle	0,11	0,15	0,13	0,09	0,08	0,29	0,08	0,30
Poids	0,14	0,10	0,17	0,04	0,11	0,19	0,08	0,31
NEC	0,07	0,38	0,02	0,78	0,10	0,21	0,12	0,14
Pli Cutané	<u>-0,01</u>	<u>0,88</u>	<u>-0,04</u>	<u>0,67</u>	<u>-0,01</u>	<u>0,94</u>	<u>-0,001</u>	<u>0,99</u>
VARIABLES MORPHOMETRIQUES mesurées								
TAILLEC	0,19	0,02	0,16	0,045	0,15	0,08	0,20	0,02
VIDESST	0,10	0,23	0,09	0,29	0,11	0,20	0,08	0,33
THORAX	0,21	0,01	0,21	0,01	0,16	0,045	0,19	0,02
TETE	-0,05	0,51	-0,06	0,48	-0,07	0,37	-0,02	0,81
ENCOLURE	0,00	0,99	-0,03	0,73	0,03	0,77	0,02	0,78
LONGUEUR	0,06	0,46	0,05	0,58	0,06	0,49	0,07	0,42
LONGUEURtot	0,03	0,68	0,002	0,98	0,04	0,64	0,06	0,48
IEPAULEPOINTEHANCHE	<u>- 0,03</u>	<u>0,76</u>	<u>0,05</u>	<u>0,58</u>	<u>- 0,04</u>	<u>0,63</u>	<u>- 0,08</u>	<u>0,35</u>
ICOUDEGRASSET	<u>- 0,07</u>	<u>0,42</u>	<u>- 0,05</u>	<u>0,52</u>	<u>- 0,04</u>	<u>0,64</u>	<u>- 0,05</u>	<u>0,52</u>
DOSAV	0,04	0,62	0,005	0,95	0,03	0,72	0,08	0,34
DOSARR	0,16	0,06	0,137	0,10	0,17	0,04	0,14	0,09
ADOS	0,14	0,08	0,09	0,26	0,13	0,12	0,18	0,03
HGARROT	-0,07	0,43	-0,04	0,66	-0,05	0,56	-0,09	0,26
IGARROT	-0,10	0,25	-0,04	0,63	-0,07	0,37	-0,15	0,07
Segments								
SCAPULA	0,13	0,13	0,12	0,14	0,08	0,33	0,13	0,121
HUMERUS	0,05	0,56	0,07	0,38	0,02	0,78	0,02	0,81
RADIUS	0,08	0,31	0,006	0,94	0,12	0,13	0,14	0,09
METACARPE	<u>- 0,002</u>	<u>0,98</u>	<u>0,02</u>	<u>0,78</u>	<u>- 0,02</u>	<u>0,80</u>	<u>- 0,05</u>	<u>0,53</u>
PHALANGEA	0,15	0,06	0,16	0,06	0,13	0,12	0,13	0,13
Angles et inclinaisons								
IEPAULE	0,03	0,74	-0,01	0,87	0,07	0,42	0,05	0,56
IHUMERUS	<u>0,03</u>	<u>0,74</u>	<u>0,10</u>	<u>0,23</u>	<u>- 0,01</u>	<u>0,87</u>	<u>- 0,003</u>	<u>0,97</u>
AEPAULE	0,06	0,49	0,05	0,56	0,05	0,56	0,06	0,46
ACOUDE	-0,01	0,86	-0,02	0,78	-0,02	0,82	0,003	0,97

AGENOUE	-0,16	0,047	-0,14	0,08	-0,14	0,08	-0,15	0,06
Segments								
COXAE	0,05	0,52	0,06	0,43	0,03	0,68	0,04	0,65
SACRE	0,03	0,75	0,007	0,93	0,05	0,55	0,03	0,71
FEMUR	0,09	0,26	0,11	0,20	0,05	0,55	0,08	0,30
TIBIA	0,10	0,22	0,11	0,17	0,06	0,49	0,09	0,30
METATARSE	-0,03	0,71	-0,05	0,56	-0,001	0,99	-0,02	0,79
PHALANGEP	0,28	0,0006	0,28	0,0005	0,22	0,008	0,24	0,003
Angles et inclinaisons								
IBASSIN	0,03	0,74	-0,08	0,34	0,11	0,20	0,10	0,21
IFEMUR	-0,07	0,41	-0,04	0,61	-0,08	0,31	-0,07	0,36
AHANCHE	-0,04	0,64	-0,10	0,23	0,01	0,90	0,02	0,85
AGRASSET	-0,06	0,47	-0,11	0,18	-0,03	0,69	-0,003	0,97
AJARRET	0,02	0,78	0,019	0,82	0,005	0,95	0,03	0,67

VARIABLES MORPHOMETRIQUES calculées

<u>IC_{PROFIL}</u>	<u><0,001</u>	<u>0,99</u>	<u>0,02</u>	<u>0,84</u>	<u>- 0,002</u>	<u>0,22</u>	<u>- 0,01</u>	<u>0,88</u>
<u>IC_{COMPACTITE}</u>	<u>- 0,06</u>	<u>0,50</u>	<u>- 0,06</u>	<u>0,47</u>	<u>- 0,05</u>	<u>0,52</u>	<u>- 0,04</u>	<u>0,65</u>
<u>IC_{RELATIF}</u>	- 0,004	0,58	- 0,04	0,59	- 0,05	0,55	- 0,03	0,68
<u>S_{HODGSON}</u>	0,14	0,10	0,17	0,0432	0,11	0,19	0,08	0,31
<u>S_{BRODY}</u>	0,14	0,10	0,17	0,0434	0,11	0,19	0,08	0,31
<u>IS_{HODGSON}</u>	0,14	0,10	0,17	0,0453	0,11	0,19	0,08	0,32
<u>IS_{BRODY}</u>	0,14	0,10	0,17	0,0438	0,11	0,19	0,08	0,31
HG/TAILLEC	- 0,04	0,61	- 0,02	0,83	- 0,02	0,81	- 0,07	0,37
Membre antérieur								
RADIUS/METACARPE	0,08	0,32	0,01	0,89	0,10	0,22	0,13	0,10
RADIUS/HG	0,01	0,87	- 0,07	0,40	0,06	0,44	0,08	0,36
THORAX/HG	0,11	0,19	0,12	0,14	0,07	0,40	0,09	0,28
Triangle postérieur								
<u>GRASSETPTEHANCHE</u>	<u>- 0,11</u>	<u>0,20</u>	<u>- 0,08</u>	<u>0,38</u>	<u>- 0,09</u>	<u>0,31</u>	<u>0,11</u>	<u>0,22</u>
COXAE/FEMUR	- 0,02	0,85	- 0,01	0,86	<0,001	0,99	- 0,03	0,75
<u>COXAE/GRASSETPTEHANCHE</u>	<u>0,11</u>	<u>0,20</u>	<u>0,09</u>	<u>0,28</u>	<u>0,08</u>	<u>0,38</u>	<u>0,10</u>	<u>0,26</u>
<u>FEMUR/GRASSETPTEHANCHE</u>	<u>0,13</u>	<u>0,13</u>	<u>0,09</u>	<u>0,27</u>	<u>0,10</u>	<u>0,27</u>	<u>0,14</u>	<u>0,11</u>

IRE = Indice en Raid d'Endurance ; r = coefficient de corrélation ; p = p-value

Annexe 3 : Catégories d'indices IRE

Tableau 35 – Annexe 3 : Résultats des analyses de variances GLM sur les paramètres morphologiques et morphométriques des chevaux selon leur catégorie d'indice IRE, par classe d'âge

		4 ans	5 ans	6 ans	
VARIABLES MORPHOLOGIQUES					
	Hauteur au Garrot	0,01	0,49	0,047	
	Périmètre Thoracique	0,37	0,10	0,36	
	Longueur Corporelle	0,47	0,34	0,24	
	Poids	0,15	0,29	0,52	
	NEC	0,93	0,47	0,95	
	<u>Pli Cutané</u>	<u>0,82</u>	<u>0,21</u>	<u>0,84</u>	
VARIABLES MORPHOMETRIQUES mesurées					
TAILLE	TAILLEC	0,78	0,44	0,05	
	VIDESST	0,002	0,10	0,14	
	THORAX	0,84	0,84	0,02	
LIGNE DU DESSUS	TETE	0,11	0,50	0,41	
	ENCOLURE	0,16	0,22	0,18	
	LONGUEUR	0,61	0,78	0,43	
	LONGUEURtot	0,80	0,40	0,92	
	<u>IEPAULEPOINTEHANCHE</u>	<u>0,34</u>	<u>0,51</u>	<u>0,74</u>	
	<u>ICOUDEGRASSET</u>	<u>0,94</u>	<u>0,25</u>	<u>0,28</u>	
DOS	DOSAV	0,50	0,36	0,14	
	DOSARR	0,58	0,24	0,63	
	ADOS	0,89	0,58	0,40	
	HGARROT	0,19	0,95	0,99	
	IGARROT	0,53	0,52	0,47	
ANTERIEURS Segments	SCAPULA	0,49	0,60	0,38	
	HUMERUS	0,35	0,41	0,07	
	RADIUS	0,34	0,17	0,47	
	<u>METACARPE</u>	<u>0,61</u>	<u>0,54</u>	<u>0,96</u>	
	PHALANGEA	0,17	0,89	0,07	
	Angles et inclinaisons	IEPAULE	0,60	0,43	0,71
		<u>IHUMERUS</u>	<u>0,04</u>	<u>0,70</u>	<u>0,71</u>
		AEPAULE	0,09	0,95	0,27
		ACOUDE	0,0433	0,63	0,41

	AGENOUE	0,85	0,57	0,045
POSTERIEURS Segments	COXAE	0,68	0,32	0,23
	SACRE	0,27	0,57	0,90
	FEMUR	0,85	0,48	0,22
	TIBIA	0,88	0,007	0,0338
	METATARSE	0,96	0,26	0,56
	PHALANGEP	0,18	0,35	0,002
Angles et inclinaiions	IBASSIN	0,94	0,98	0,83
	IFEMUR	0,30	0,49	0,31
	AHANCHE	0,56	0,56	0,24
	AGRASSET	0,71	0,16	0,71
	AJARRET	0,20	0,19	0,39

VARIABLES MORPHOMETRIQUES calculées

INDICES	<u>ICPROFIL</u>	<u>0,95</u>	<u>0,45</u>	<u>0,91</u>
	<u>ICCOMPACITE</u>	<u>0,34</u>	<u>0,31</u>	<u>0,89</u>
	<u>ICRELATIF</u>	0,61	0,52	0,80
SURFACES	S _{HODGSON}	0,15	0,29	0,52
	S _{BRODY}	0,15	0,28	0,52
INDICES SURFACIQUES	IS _{HODGSON}	0,15	0,26	0,54
	IS _{BRODY}	0,15	0,28	0,53
RAPPORTS	HG/TAILLEC	0,0002	0,54	0,84
Membre antérieur	RADIUS/METACARPE	0,94	0,80	0,82
	RADIUS/HG	0,96	0,34	0,66
	THORAX/HG	0,10	0,27	0,18
Triangle postérieur	<u>GRASSETPTEHANCHE</u>	<u>0,50</u>	<u>0,53</u>	<u>0,30</u>
	COXAE/FEMUR	0,41	0,02	0,51
	<u>COXAE/GRASSETPTEHANCHE</u>	<u>0,53</u>	<u>0,08</u>	<u>0,51</u>
	<u>FEMUR/GRASSETPTEHANCHE</u>	<u>0,76</u>	<u>0,80</u>	<u>0,25</u>

Annexe 4 : Longévité de carrière

Tableau 36 - Annexe 4 : Résultats des tests de Student ou Mann-Whitney Wilcoxon pour les variables morphologiques et morphométriques entre les groupes de durée de carrière par rapport à l'âge de dix ans, par classe d'âge à la prise des mesures

		4 ans	5 ans	6 ans
VARIABLES MORPHOLOGIQUES				
	Hauteur au Garrot	0,29	0,18	0,12
	Périmètre Thoracique	0,05	0,93	0,14
	Longueur Corporelle	0,16	0,86	0,72
	Poids	0,06	0,96	0,79
	NEC	0,46	0,36	0,10
	<u>Pli Cutané</u>	<u>0,27</u>	<u>0,61</u>	<u>0,08</u>
VARIABLES MORPHOMETRIQUES mesurées				
TAILLE	TAILLEC	0,01	0,68	0,50
	VIDESST	0,83	0,14	0,97
	THORAX	0,21	0,23	0,41
LIGNE DU DESSUS	TETE	0,53	0,79	0,63
	ENCOLURE	0,75	0,74	0,69
	LONGUEUR	0,005	0,67	0,99
	LONGUEURtot	0,03	0,72	0,89
	<u>IEPAULEPOINTEHANCHE</u>	<u>0,72</u>	<u>0,20</u>	<u>0,96</u>
	<u>ICOUDEGRASSET</u>	<u>0,66</u>	<u>0,35</u>	<u>0,70</u>
DOS	DOSAV	0,19	0,43	0,32
	DOSARR	0,97	0,60	0,32
	ADOS	0,36	0,33	0,99
	HGARROT	0,22	0,74	0,80
	IGARROT	0,80	0,27	0,48
ANTERIEURS Segments Angles et inclinaisons	SCAPULA	0,08	0,22	0,64
	HUMERUS	0,93	0,86	0,39
	RADIUS	0,67	0,26	0,40
	<u>METACARPE</u>	<u>0,89</u>	<u>0,76</u>	<u>0,47</u>
	PHALANGEA	0,05	0,61	0,57
	IEPAULE	0,69	0,71	0,39
	<u>IHUMERUS</u>	<u>0,59</u>	<u>0,33</u>	<u>0,92</u>
	AEPAULE	0,39	0,19	0,30
	ACOUDE	0,07	0,83	0,20
	AGENOUE	0,75	0,94	0,96

POSTERIEURS Segments	COXAE	0,001	0,55	0,86	
	SACRE	0,41	0,17	0,34	
	FEMUR	0,05	0,99	0,59	
	TIBIA	0,006	0,94	0,98	
	METATARSE	0,71	0,60	0,55	
	PHALANGEP	0,02	0,89	0,07	
	Angles et inclinai	IBASSIN	0,0007	0,95	0,52
		IFEMUR	0,35	0,10	0,13
		AHANCHE	0,0007	0,24	0,50
		AGRASSET	0,17	0,26	0,20
AJARRET		0,78	0,23	0,69	
VARIABLES MORPHOMETRIQUES calculées					
INDICES	<u>ICPROFIL</u>	<u>0,22</u>	<u>0,61</u>	<u>0,73</u>	
	<u>ICCOMPACITE</u>	<u>0,10</u>	<u>0,82</u>	<u>0,90</u>	
	ICRELATIF	0,82	0,89	0,47	
SURFACES	S _{HODGSON}	0,06	0,96	0,79	
	S _{BRODY}	0,06	0,96	0,80	
INDICES SURFACIQUES	IS _{HODGSON}	0,06	0,95	0,83	
	IS _{BRODY}	0,06	0,96	0,81	
RAPPORTS Membre antérieur	HG/TAILLEC	0,13	0,37	0,15	
	RADIUS/METACARPE	0,52	0,48	0,48	
	RADIUS/HG	0,37	0,38	0,28	
	THORAX/HG	0,49	0,06	0,55	
	Triangle postérieur	<u>GRASSETPTEHANCHE</u>	<u>0,51</u>	<u>0,41</u>	<u>0,18</u>
		COXAE/FEMUR	0,08	0,51	0,79
		<u>COXAE/GRASSETPTEHANCHE</u>	<u>0,99</u>	<u>0,51</u>	<u>0,52</u>
	<u>FEMUR/GRASSETPTEHANCHE</u>	<u>0,32</u>	<u>0,37</u>	<u>0,34</u>	

Annexe 5 : Compétiteurs de haut niveau

Tableau 37 - Annexe 5 : Résultats des tests de Student ou Mann-Whitney Wilcoxon pour les variables morphologiques et morphométriques entre les groupes de compétiteurs de haut niveau ou non, par classe d'âge

		4 ans	5 ans	6 ans	
VARIABLES MORPHOLOGIQUES					
	Hauteur au Garrot	0,69	0,005	0,03	
	Périmètre Thoracique	0,91	0,03	0,06	
	Longueur Corporelle	0,53	0,04	0,69	
	Poids	0,76	0,10	0,04	
	NEC	0,40	0,53	0,89	
	<u>Pli Cutané</u>	<u>0,84</u>	<u>0,69</u>	<u>0,76</u>	
VARIABLES MORPHOMETRIQUES mesurées					
TAILLE	TAILLEC	0,91	0,31	0,0237	
	VIDESST	0,23	0,17	0,07	
	THORAX	0,51	0,46	0,46	
LIGNE DU DESSUS	TETE	0,76	0,36	0,38	
	ENCOLURE	0,10	0,37	0,97	
	LONGUEUR	0,58	0,51	0,58	
	LONGUEURtot	0,50	0,44	0,55	
	<u>IEPAULEPOINTEHANCHE</u>	<u>0,43</u>	<u>0,80</u>	0,0459	
	<u>ICOUDEGRASSET</u>	<u>0,16</u>	<u>0,31</u>	<u>0,22</u>	
DOS	DOSAV	0,25	0,54	0,19	
	DOSARR	0,19	0,91	0,29	
	ADOS	0,96	0,07	0,81	
	HGARROT	0,95	0,42	0,08	
	IGARROT	0,46	0,10	0,68	
ANTERIEURS Segments	SCAPULA	0,54	0,15	0,62	
	HUMERUS	0,83	0,32	0,80	
	RADIUS	0,21	0,68	0,91	
	<u>METACARPE</u>	<u>0,92</u>	<u>0,95</u>	0,0429	
	PHALANGEA	0,72	0,06	0,59	
	Angles et inclinaiions	IEPAULE	0,72	0,09	0,22
		<u>IHUMERUS</u>	<u>0,18</u>	<u>0,65</u>	<u>0,26</u>
		AEPAULE	0,20	0,44	0,87
ACOUDE		0,73	0,82	0,96	
	AGENOUE	0,18	0,84	0,91	

POSTERIEURS	COXAE	0,98	0,91	0,0233
	Segments	SACRE	0,22	0,67
	FEMUR	0,31	0,67	0,52
	TIBIA	0,26	0,0053	0,23
	METATARSE	0,89	0,47	0,29
	PHALANGEP	0,18	0,78	0,54
Angles et inclinaiions	IBASSIN	0,36	0,20	0,48
	IFEMUR	0,89	0,53	0,18
	AHANCHE	0,56	0,56	0,60
	AGRASSET	0,70	0,0202	0,74
	AJARRET	0,84	0,09	0,61
VARIABLES MORPHOMETRIQUES calculées				
INDICES	<u>ICPROFIL</u>	<u>0,66</u>	<u>0,64</u>	<u>0,33</u>
	<u>ICCOMPACITE</u>	<u>0,84</u>	<u>0,23</u>	<u>0,09</u>
	ICRELATIF	0,53	0,74	0,21
SURFACES	S _{HODGSON}	0,76	0,10	0,0444
	S _{BRODY}	0,78	0,10	0,0428
INDICES SURFACIQUES	IS _{HODGSON}	0,86	0,10	0,0386
	IS _{BRODY}	0,80	0,10	0,0416
RAPPORTS	HG/TAILLEC	0,50	0,94	0,13
	Membre antérieur			
	RADIUS/METACARPE	0,38	0,84	0,18
	RADIUS/HG	0,27	0,79	0,47
	THORAX/HG	0,27	0,80	0,64
Triangle postérieur	<u>GRASSETPTEHANCHE</u>	<u>0,32</u>	<u>0,09</u>	<u>0,0035</u>
	COXAE/FEMUR	0,28	0,88	0,06
	<u>COXAE/GRASSETPTEHANCHE</u>	<u>0,56</u>	<u>0,16</u>	<u>0,0221</u>
	<u>FEMUR/GRASSETPTEHANCHE</u>	<u>0,23</u>	<u>0,11</u>	<u>0,0048</u>

MORPHOLOGIE DU JEUNE CHEVAL D'ENDURANCE : RECHERCHE DE CRITÈRES ASSOCIÉS À LA PERFORMANCE ET LA LONGÉVITÉ EN COMPÉTITION

AUTEUR : Auxane MASSE

RÉSUMÉ :

Cette thèse examine le lien entre la morphologie des jeunes chevaux de race Arabe ou croisés Arabe avec leur performance et leur longévité de carrière en course d'endurance. L'objectif est d'identifier des associations significatives entre la morphologie au jeune âge et les résultats sportifs ultérieurs, afin d'identifier des critères morphologiques spécifiques qui pourraient être utilisés pour la sélection génétique.

Les données morphologiques ont été recueillies sur un échantillon de 489 chevaux Arabes ou croisés Arabes, âgés de quatre à six ans, entre 2011 et 2014, dans des conditions répétables. Elles incluent des mesures morphologiques directes et morphométriques - longueurs, angles et inclinaisons des rayons osseux - évaluées sur une photographie de profil. Ces caractères sont comparés aux performances des chevaux en compétition d'endurance à travers la valeur de leurs indices de performance en endurance (IRE) attribués par l'INRAE, de leur participation à des courses d'endurance de haut niveau, et de leur longévité de carrière.

En raison du grand nombre de critères étudiés, la significativité des résultats statistiques obtenus n'est pas fiable. Cette étude ne peut donc être considérée que comme exploratoire et ses conclusions devront être validées par des études complémentaires. Quelques variables morphologiques apparaissent faiblement corrélées à la performance. Les variables illustrant un grand format semblent corrélées à de meilleurs indices de performance, mais apparaissent en défaveur d'une carrière longue.

Une sélection exclusivement basée sur des critères morphologiques ne semble pas pertinente au vu des faibles corrélations observées. Il semblerait plus approprié d'analyser la performance en incluant d'autres facteurs physiologiques intrinsèques avant d'établir un programme de sélection génétique. La longévité de carrière semble être un critère d'étude essentiel à inclure dans ce type d'étude afin de vérifier que la sélection en faveur de la performance n'est pas antagoniste avec la capacité à concourir sur du long terme.

MOTS CLÉS :

MORPHOLOGIE, CONFORMATION, JEUNE, CHEVAL, ENDURANCE, PERFORMANCE SPORTIVE, CARRIÈRE, LONGÉVITÉ SPORTIVE, MORPHOMÉTRIE, PUR SANG ARABE, SÉLECTION

JURY :

Président : Pr Loïc DESQUILBET

Directrice de thèse : Pr Céline ROBERT

Examineur : Pr Henry CHATEAU

MORPHOLOGY OF THE YOUNG ENDURANCE HORSE: CRITERIA ASSOCIATED WITH CAREER PERFORMANCE AND LONGEVITY IN ENDURANCE RACE

AUTHOR: Auxane MASSE

SUMMARY:

This thesis explores the relationship between the morphology of young purebred or crossbred Arabian horses and their career performance and durability in endurance racing. The objective is to identify significant correlations between early-age morphology and later sporting outcomes, aiming to pinpoint specific morphological criteria for potential genetic selection.

Morphological data were taken on a sample of 489 young purebred or crossbred Arabian horses aged four to six, between 2011 and 2014, under repeatable conditions. They include direct morphological and morphometric measurements - lengths, angles and inclinations of the bone segments - assessed on a profile picture. These data are then compared to the horses' endurance competition performances using performance indices assigned by INRAE, their participation in high-level endurance races, and their career longevity.

Due to the large number of criteria studied, the statistical significance of the results obtained cannot be relied upon. This study can therefore only be considered exploratory, and its conclusions will need to be validated by further studies. Some morphological variables appear to be weakly correlated with performance. Variables illustrating a large size seem to be correlated with better performance indices, but appear to be detrimental to a long career.

Selection entirely based on morphological criteria appears less relevant due to these weak correlations. It would seem more appropriate to analyse performance by including other intrinsic physiological factors before establishing a genetic selection programme. Career longevity would seem to be an essential criterion to include in this type of study, to ensure that selection for performance does not conflict with the ability to compete over the long term.

KEYWORDS:

MORPHOLOGY, CONFORMATION, YOUNG, HORSE, ENDURANCE, SPORT PERFORMANCE, CAREER, SPORT LONGEVITY, MORPHOMETRY, ARABIAN HORSE, SELECTION

JURY:

Chairperson: Pr Loïc DESQUILBET

Thesis Director: Pr Céline ROBERT

Reviewer: Pr Henry CHATEAU