

Année 2014

**CARACTÉRISATION DE LA LOCOMOTION DU
CHEVAL D'ENDURANCE :
CRITÈRES ASSOCIÉS À LA PERFORMANCE EN
COURSE À VITESSE LIBRE**

THÈSE

Pour le

DOCTORAT VÉTÉRINAIRE

Présentée et soutenue publiquement devant
LA FACULTÉ DE MÉDECINE DE CRÉTEIL

le.....

par

Julie COLIN DE VERDIÈRE

Née le 28 juillet 1989 à Paris 12^{ème}

JURY

**Président : Pr.
Professeur à la Faculté de Médecine de CRÉTEIL**

**Membres
Directeur : Mme Céline ROBERT
Maître de conférences à l'ENVA
Assesseur : M. Fabrice AUDIGIÉ
Professeur à l'ENVA**

Invité : Dr Eric BARREY

LISTE DES MEMBRES DU CORPS ENSEIGNANT

Directeur : M. le Professeur GOGNY Marc

Directeurs honoraires : MM. les Professeurs : COTARD Jean-Pierre, MIALOT Jean-Paul, MORAILLON Robert, PARODI André-Laurent, PILET Charles, TOMA Bernard.
Professeurs honoraires : Mme et M. : BÉNET Jean-Jacques, BRUGERE Henri, BRUGERE-PICOUX Jeanne, BUSSIERAS Jean, CERF Olivier, CLERC Bernard, CRESPEAU François, DEPUTTE Bertrand, MOUTHON Gilbert, MILHAUD Guy, POUCHÉLON Jean-Louis, ROZIER Jacques.

DEPARTEMENT D'ELEVAGE ET DE PATHOLOGIE DES EQUIDES ET DES CARNIVORES (DEPEC)

Chef du département par intérim : M. GRANDJEAN Dominique, Professeur - Adjoint : M. BLOT Stéphane, Professeur

UNITE DE CARDIOLOGIE - Mme CHETBOUL Valérie, Professeur * - Mme GKOUNI Vassiliki, Praticien hospitalier - Mme SECHI-TREHOU, Praticien hospitalier UNITE DE CLINIQUE EQUINE - M. AUDIGIE Fabrice, Professeur - M. DENOIX Jean-Marie, Professeur - Mme BERTON Lélia, Maître de conférences contractuel - Mme GIRAUDET Aude, Praticien hospitalier * - M. LECHARTIER Antoine, Maître de conférences contractuel - Mme MESPOULHES-RIVIERE Céline, Praticien hospitalier - Mme TRACHSEL Dagmar, Maître de conférences contractuel UNITE D'IMAGERIE MEDICALE - Mme PEY Pascaline, Maître de conférences contractuel - Mme STAMBOULI Fozzia, Praticien hospitalier UNITE DE MEDECINE - Mme BENCHEKROUH Ghita, Maître de conférences contractuel - M. BLOT Stéphane, Professeur* - Mme FREICHE-LEGROS Valérie, Praticien hospitalier - Mme MAUREY-GUENECH Christelle, Maître de conférences UNITE DE MEDECINE DE L'ELEVAGE ET DU SPORT - Mme CLERO Delphine, Maître de conférences contractuel - M. GRANDJEAN Dominique, Professeur* - Mme YAGUIYAN-COLLARD Laurence, Maître de conférences contractuel	DISCIPLINE : NUTRITION-ALIMENTATION - M. PARAGON Bernard, Professeur DISCIPLINE : OPHTALMOLOGIE - Mme CHAHORY Sabine, Maître de conférences UNITE DE PARASITOLOGIE ET MALADIES PARASITAIRES - M. BLAGA Radu Gheorghe, Maître de conférences (rattaché au DPASP) - M. CHERMETTE René, Professeur - Mme FAYRE Noëlle, Praticien hospitalier - M. GUILLOT Jacques, Professeur* - Mme LAGRANGE Isabelle, Praticien hospitalier - Mme MARIIGNAC Geneviève, Maître de conférences - M. POLACK Bruno, Maître de conférences UNITE DE PATHOLOGIE CHIRURGICALE - M. FAYOLLE Pascal, Professeur - M. MAILHAC Jean-Marie, Maître de conférences - M. MAHASSERD Mathieu, Maître de conférences contractuel - M. MOISSONNIER Pierre, Professeur* - Mme RAVARY-PLUMBOEN Béatrice, Maître de conférences (rattachée au DPASP) - Mme VIATEAU-DUVAL Véronique, Professeur - M. ZILBERSTEIN Luca, Maître de conférences DISCIPLINE : URGENCE SOINS INTENSIFS - Vacant DISCIPLINE : NOUVEAUX ANIMAUX DE COMPAGNIE - M. PIGNON Charly, Praticien hospitalier
---	---

DEPARTEMENT DES PRODUCTIONS ANIMALES ET DE LA SANTE PUBLIQUE (DPASP)

Chef du département : M. MILLEMANN Yves, Professeur - Adjoint : Mme DUFOUR Barbara, Professeur

UNITE D'HYGIENE ET INDUSTRIE DES ALIMENTS D'ORIGINE ANIMALE - M. AUGUSTIN Jean-Christophe, Maître de conférences - M. BOLNOT François, Maître de conférences* - M. CARLIER Vincent, Professeur UNITE DES MALADIES CONTAGIEUSES - Mme DUFOUR Barbara, Professeur* - Mme HADDAD/HOANG-XUAN Nadia, Professeur - Mme PRAUD Anne, Maître de conférences - Mme RIVIERE Julie, Maître de conférences contractuel UNITE DE PATHOLOGIE MEDICALE DU BETAII ET DES ANIMAUX DE BASSE-COUR - M. ADJOU Karim, Maître de conférences* - M. BELBIS Guillaume, Assistant d'enseignement et de recherche contractuel - M. HESKIA Bernard, Professeur contractuel - M. MILLEMANN Yves, Professeur	UNITE DE REPRODUCTION ANIMALE - Mme CONSTANT Fabienne, Maître de conférences - M. DESBOIS Christophe, Maître de conférences (rattaché au DEPEC) - M. FONTBONNE Alain, Maître de conférences (rattaché au DEPEC) - Mme MAENHOUDT Cindy, Praticien hospitalier - Mme MASSE-MOREL Gaëlle, Maître de conférences contractuel - M. MALIFFRE Vincent, Assistant d'enseignement et de recherche contractuel - M. NUDELJANN Nicolas, Maître de conférences (rattaché au DEPEC) - M. REMY Dominique, Maître de conférences* UNITE DE ZOOTECNIE, ECONOMIE RURALE - M. ARNE Pascal, Maître de conférences* - M. BOSSE Philippe, Professeur - M. COURREAU Jean-François, Professeur - Mme GRIVARD-BALLIF Bénédicte, Professeur - Mme LEROY-BARASSIN Isabelle, Maître de conférences - M. PONTER Andrew, Professeur
--	---

DEPARTEMENT DES SCIENCES BIOLOGIQUES ET PHARMACEUTIQUES (DSBP)

Chef du département : Mme COMBRISSEON Hélène, Professeur - Adjoint : Mme LE PODER Sophie, Maître de conférences

UNITE D'ANATOMIE DES ANIMAUX DOMESTIQUES - M. CHATEAU Henry, Maître de conférences* - Mme CREVIER-DENOIX Nathalie, Professeur - M. DEGUEURCE Christophe, Professeur - Mme ROBERT Céline, Maître de conférences DISCIPLINE : ANGLAIS - Mme CONAN Muriel, Professeur certifié UNITE DE BIOCHIMIE - M. BELLIER Sylvain, Maître de conférences* - M. MICHAUX Jean-Nicolas, Maître de conférences DISCIPLINE : BIostatISTIQUES - M. DESQUILBET Loïc, Maître de conférences DISCIPLINE : EDUCATION PHYSIQUE ET SPORTIVE - M. PHILIPS Pascal, Professeur certifié DISCIPLINE : ETHOLOGIE - Mme GILBERT Caroline, Maître de conférences UNITE DE GENETIQUE MEDICALE ET MOLECULAIRE - Mme ABITBOL Marie, Maître de conférences - M. PANTHIER Jean-Jacques, Professeur*	UNITE D'HISTOLOGIE, ANATOMIE PATHOLOGIQUE - Mme CORDONNIER-LEFORT Nathalie, Maître de conférences* - M. FONTAINE Jean-Jacques, Professeur - Mme LALOY Eve, Maître de conférences contractuel - M. REYES GOMEZ Edouard, Assistant d'enseignement et de recherche contractuel UNITE DE PATHOLOGIE GENERALE MICROBIOLOGIE, IMMUNOLOGIE - M. BOULOUIS Henri-Jean, Professeur - Mme LE ROUX Delphine, Maître de conférences - Mme QUINTIN-COLONNA Françoise, Professeur* UNITE DE PHARMACIE ET TOXICOLOGIE - Mme ENRIQUEZ Brigitte, Professeur - M. PERROT Sébastien, Maître de conférences - M. TISSIER Renaud, Professeur* UNITE DE PHYSIOLOGIE ET THERAPEUTIQUE - Mme COMBRISSEON Hélène, Professeur - Mme PILOT-STORCK Fanny, Maître de conférences - M. TIRET Laurent, Maître de conférences* UNITE DE VIROLOGIE - M. ELOIT Marc, Professeur - Mme LE PODER Sophie, Maître de conférences*
--	--

* responsable d'unité

REMERCIEMENTS

Au Professeur

De la Faculté de Médecine de Créteil,

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

Hommage respectueux.

Au Docteur Céline ROBERT,

Maître de conférences à l'Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort,

Qui m'a fait l'honneur de diriger ce travail,

Merci de m'avoir permis de m'engager dans ce projet.

Au Professeur Fabrice AUDIGIE,

Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort,

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

Merci de votre collaboration.

Au Docteur Eric BARREY,

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

Merci pour votre aide.

A ma famille,

Maintenant incollable sur ce sujet.

A Juliette, Fanny, Sylvia, Amélie et Tatiana,

Tout vient à point à qui sait attendre.

Aux anciens, Lola, Hpesoj, Gwen, Hélène et Valentin...

Encore et toujours d'actualité.

Aux distractions,

Quettehou, Julie et Carole,

La Margotière,

Miss, Taïma, Icare, Elixir, Pompon, Décibel et Iota.

Aux ambitions,

« Je veux être vétérinaire parce que j'aime les animaux » ...

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE DES FIGURES	5
SOMMAIRE DES TABLEAUX	7
INTRODUCTION.....	9
PREMIÈRE PARTIE : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE	13
I. Problématique de la locomotion en endurance équestre	15
A. Présentation de l'endurance équestre	15
1. Historique de la discipline.....	15
2. Les différentes épreuves d'endurance	15
3. Le déroulement de la course.....	16
4. Evolution de la discipline	17
B. Les boiteries du cheval d'endurance	18
1. Causes musculo-squelettiques (Misheff, 2011 ; Holbrook, 2011).....	18
a. La douleur en région métacarpienne proximale palmaire.....	18
b. Les problèmes de pied	19
c. Arthrose, capsulite, synovite et pathologie péri-articulaire des articulations métacarpophalangiennes et métatarsophalangiennes	20
d. Pathologie de stress de la partie distale de l'os métacarpien III ou de l'os métatarsien III	20
e. Tendinite du fléchisseur superficiel du doigt	20
f. Myalgie paravertébrale et glutéale.....	21
g. Arthrose de l'étage distal du jarret	21
h. Desmite du corps et des branches du ligament suspenseur du boulet	22
i. Autres atteintes osseuses	22
j. Myopathie d'effort	22
2. Troubles métaboliques	23

C.	Jugement des boiteries par rapport au classement	24
1.	Déroulement du contrôle vétérinaire.....	24
a.	Règlement des épreuves d'endurance et classement des concurrents	24
b.	Paramètres évalués lors du contrôle vétérinaire et critères d'élimination	26
i.	Examen général du cheval	26
ii.	Examen de la fonction cardiaque	26
iii.	Examen de la fonction respiratoire	27
iv.	Couleur des muqueuses.....	27
v.	Temps de réplétion capillaire.....	27
vi.	Persistance du pli de peau	27
vii.	Température rectale.....	27
viii.	Examen de la fonction digestive	27
ix.	Examen de la fonction nerveuse	28
x.	Examen de la fonction locomotrice	28
c.	Les différents contrôles vétérinaires.....	28
i.	Le contrôle initial	28
ii.	Les contrôles intermédiaires	28
iii.	Le contrôle final	29
2.	Boiterie et élimination.....	29
3.	Limites du contrôle vétérinaire	29
D.	Sélection des chevaux d'endurance.....	30
1.	Profil du cheval d'endurance.....	30
i.	Morphologie.....	35
ii.	Locomotion	36
2.	Indices de performance et indices génétiques (ACA, IFCE)	36
II.	Méthodes d'étude de la locomotion et de caractérisation des boiteries	41

A.	Evaluation subjective de la locomotion du cheval	41
1.	Examen clinique locomoteur.....	41
2.	Epreuve d'élevage (d'après l'Association du Cheval Arabe)	45
B.	Evaluation objective de la locomotion chez le cheval	47
1.	Les méthodes cinétiques d'étude de la locomotion.....	47
2.	Les méthodes cinématiques d'étude de la locomotion.....	51
	DEUXIÈME PARTIE : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE.....	55
I.	Matériels et méthodes.....	59
A.	Effectif étudié et mode de recrutement	59
B.	Protocole.....	60
1.	Acquisition des données.....	60
2.	Traitement des données	61
i.	Paramètres de coordination.....	63
ii.	Paramètres cinématiques.....	63
iii.	Paramètres énergétiques.....	64
II.	Résultats	67
A.	Etude descriptive de l'échantillon	67
1.	Caractéristiques des chevaux de l'étude.....	67
a.	Race	67
b.	Age.....	67
c.	Sexe	67
2.	Etude descriptive des performances des chevaux de l'étude	68
a.	Performance sur la course.....	68
b.	Carrière sportive	70
B.	Caractérisation des allures des chevaux d'endurance	72
1.	Relation entre les allures et les performances sur la course	74
a.	Locomotion et lieu de compétition.....	74

b.	Effet physique de la piste d'enregistrement	75
c.	Locomotion et issue de la course.....	76
d.	Locomotion et rang de classement	78
2.	Relation entre les allures et la carrière sportive	78
III.	Discussion	79
A.	Protocole.....	79
1.	Recrutement des chevaux.....	79
2.	Méthode Equimetrix®.....	79
3.	Traitement des données	80
a.	Performances sur la course	80
b.	Validité des indices de performance.....	81
B.	Résultats	82
1.	Apport de l'étude.....	82
a.	Relation entre les allures et les performances lors de l'épreuve.....	82
i.	Aspect informatif du pas	82
ii.	Intérêt prédictif de la régularité au pas.....	83
iii.	Puissance médiolatérale au pas	85
b.	Relation entre locomotion et carrière sportive	85
2.	Limites.....	86
a.	Taille de l'échantillon.....	86
b.	Variabilité de la piste d'enregistrement.....	86
3.	Perspectives	86
a.	Perspectives pratiques.....	86
b.	Perspectives scientifiques	87
	CONCLUSION	89
	BIBLIOGRAPHIE	91

SOMMAIRE DES FIGURES

Figure 1 : Participation relative des différentes voies métaboliques en fonction de la discipline équestre (Couroucé-Malblanc, 2011)	32
Figure 2 : Grille de jugement pour les concours d'élevage à orientation endurance (ACA).....	46
Figure 3 : Fixation de l'accéléromètre à la sangle (http://genendurance.over-blog.com) .	60
Figure 4 : Mise en place du dispositif sur le cheval	60
Figure 5 : Enregistrement fourni par l'enregistreur (Equimetrix®). La courbe orange correspond à l'ensemble du tracé.	62
Figure 6 : Paramètres fournis par Equimetrix®pour un cheval au pas	62
Figure 7 : Répartition des chevaux selon l'âge	67
Figure 8 : Répartition des chevaux selon le sexe (H : hongre, M : mâle, F : femelle).....	68
Figure 9 : Catégories de performance sur la course étudiée, au sein de l'échantillon.....	69
Figure 10 : Classement et éliminations selon la longueur de la course.....	69
Figure 11 : Répartition des causes de non-classement.....	70
Figure 12 : Indices moyens de performance des chevaux de l'étude. La barre d'erreur indique l'écart-type.	71
Figure 13 : Comparaison de la distribution de l'indice de carrière (IRE) des chevaux de l'étude et de la population des chevaux d'endurance	72

SOMMAIRE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Nomenclature des épreuves françaises d'endurance (FFE 2013).....	15
Tableau 2: Règlement des épreuves Amateur 4, Amateur 4 Spéciale, Amateur 3, Amateur 2 et Amateur 1(FFE 2013)	24
Tableau 3: Règlement des épreuves Amateur 1 GP, Amateur Elite et Amateur Elite GP (FFE 2013)	25
Tableau 4 : Epreuves sur lesquelles sont recrutés les chevaux de l'étude	59
Tableau 9 : Caractéristiques de la piste dédiée au test d'allure suivant le site.....	61
Tableau 6 : Distribution des chevaux selon la longueur de la course et leur classement..	68
Tableau 7 : Description des indices de performance des chevaux de l'étude (n=251).....	71
Tableau 8 : Paramètres de la locomotion au pas : moyennes, écarts-types, médianes, maxima et minima.....	73
Tableau 9 : Paramètres de la locomotion au trot : moyennes, écarts-types, médianes, maxima et minima.....	73
Tableau 10 : Paramètres locomoteurs et morphologiques significativement corrélés	74
Tableau 11 : Effet du lieu de compétition sur les paramètres locomoteurs au pas	74
Tableau 12 : Effet du lieu de compétition sur les paramètres locomoteurs au trot	74
Tableau 13 : Effets de la longueur et du sol de la piste d'enregistrement sur les paramètres locomoteurs au pas	75
Tableau 14 : Effets de la longueur et du sol de la piste d'enregistrement sur les paramètres locomoteurs au trot	76
Tableau 15 : Groupes de moyennes selon la régularité au pas (après correction par les effets physiques de la piste d'enregistrement) ($p<0,05$)	77
Tableau 16 : Groupes de moyennes selon la régularité au pas (après correction par le lieu de compétition) ($p<0,05$).....	77
Tableau 17 : Corrélations significatives entre la locomotion et les indices de performance.....	78

INTRODUCTION

Les troubles musculo-squelettiques sont, chez les chevaux, la première cause d'interruption de leur carrière sportive (Weishaupt *et al.*, 2001). De nombreuses études montrent le lien entre la boiterie et la performance : plus de 50% des chevaux de course présenteraient une période de boiterie, qui, dans 20% des cas, les empêcherait de courir (Jeffcot *et al.*, 1982). De plus, les affections locomotrices sub-cliniques sont la cause la plus fréquente (74%) de mauvaise performance (Morris et Seeherman, 1991). Elles représentent donc une perte économique majeure pour les éleveurs, propriétaires et entraîneurs de chevaux (Barrey, 1999 ; Keegan *et al.*, 2011). Aux Etats-Unis, cette perte est estimée à plus d'un milliard de dollars par an, en tenant compte des frais vétérinaires et de la non utilisation des chevaux (USDA, 2001).

La locomotion du cheval fait l'objet de nombreuses recherches, afin de corrélérer sa qualité à un risque de boiterie ou aux performances de l'animal. D'après Barrey (1999), l'étude de la locomotion pour chaque discipline équestre permet d'identifier des facteurs prédictifs de la performance en compétition. Ainsi, un trotteur sera d'autant plus performant qu'il aura une phase de soutien courte et des valeurs hautes de fréquence et de longueur de foulée. Les chevaux d'obstacles accusant les plus faibles pénalités présentent une vitesse basse sur les foulées de saut, avec un poser des postérieurs à l'abord proche de l'obstacle, tout comme le poser des antérieurs à la réception. Enfin, les galopeurs gagnant sur de courtes distances ont une phase de contact avec le sol plus longue et une plus haute fréquence de foulée que les gagnants sur les courses de longue distance (Barrey *et al.*, 2001). Barrey *et al.* (2002) proposent une évaluation précoce de l'aptitude au dressage des chevaux par une étude de leur conformation et l'analyse de leurs allures. Chez le trotteur, des études mettent en lien la locomotion et l'aspect métabolique de la performance. Ainsi, Persson *et al.* (1991) en étudiant le profil métabolique et la locomotion sur tapis roulant ont révélé la longueur de foulée comme facteur déterminant les dépenses énergétiques par la voie aérobie à la vitesse VLA4 (vitesse à laquelle la lactatémie est égale à 4mmol/L). Toujours chez le trotteur, Ronéus *et al.* (1995) décrivent une relation significative entre le pourcentage de fibres musculaires de type IIB et la longueur de foulée maximale au trot. Schuback *et al.* (1999) concluent que le début de la fatigue est dû au patron locomoteur et au métabolisme anaérobie chez des trotteurs sur tapis roulant. Nombreuses sont les études basées sur le

trotteur, mais celui-ci présente une locomotion significativement différente du cheval d'endurance. Munoz *et al.* (2006) s'intéressent au cheval d'endurance et calculent un indice de symétrie au trot par comparaison des longueurs de foulée des bipèdes diagonaux, mais celui-ci ne permet pas de différencier des chevaux avec des performances différentes. Toutefois, le succès restant multifactoriel, il existe des cas dans lesquels performance et boiterie ne semblent pas corrélées et certains chevaux boiteux restent très performants tandis que d'autres ne retrouvent pas leur niveau même après une guérison totale de la boiterie, pour d'autres causes (Keegan, 2007).

L'examen visuel d'appréciation de la locomotion et des boiteries est une méthode qualitative qui permet un diagnostic satisfaisant dans de nombreux cas. Cette méthode reste subjective, bien que la boiterie puisse être quantifiée en grades. Elle présente une bonne répétabilité, c'est-à-dire une bonne fiabilité de l'observation de différents cas par un même intervenant, mais une reproductibilité plus faible, soit une mauvaise concordance entre les différents observateurs, selon leur expérience et les critères de qualification de la boiterie utilisés (Keegan *et al.*, 1998 ; Keegan *et al.*, 2010).

Ainsi, il importe de valider une méthode objective d'évaluation de la locomotion et des boiteries, afin de mettre en relation la locomotion d'un cheval et ses performances sur une course ou au cours de sa carrière en compétition, avec un objectif de sélection de futurs athlètes.

Le projet GenEndurance, né de la collaboration de l'équipe de Biologie Intégrative et Génomique Equine du laboratoire GABI de l'INRA de Jouy-en-Josas, de l'Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort (Docteur Céline Robert), et de l'Unité de Biologie Intégrative des Adaptations à l'Exercice de l'Inserm (Docteur Eric Barrey), a pour objectif d'identifier les biomarqueurs et les déterminants génétiques permettant de caractériser les aptitudes sportives à l'exercice aérobie en course d'endurance. Ce projet devrait permettre de caractériser les profils phénotypiques et génétiques des chevaux les plus performants, pour améliorer les critères de sélection des jeunes chevaux lors des épreuves d'élevage, et éventuellement développer, à terme, un test génétique d'évaluation de l'aptitude génétique d'un jeune cheval pour l'endurance.

Les boiteries sont la première cause de contre-performance en endurance. Cette thèse aborde le volet locomoteur de la performance au sein du projet GenEndurance. Une première partie bibliographique développe la problématique de la locomotion en

endurance équestre et expose les différentes méthodes d'analyse de la locomotion chez le cheval. Une deuxième partie présente l'étude expérimentale de la relation entre la locomotion, évaluée par accélérométrie, et, d'une part, les performances sur la course contemporaine des mesures, et, d'autre part, la carrière sportive des chevaux de l'échantillon.

PREMIÈRE PARTIE : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I. Problématique de la locomotion en endurance équestre

A. Présentation de l'endurance équestre

1. Historique de la discipline

L'endurance moderne est le sport équestre qui a évolué le plus rapidement (Misheff, 2011) : après les courses des bédouins à travers le désert, les Anglais et les Américains utilisent bien plus tard l'endurance en tant qu'entraînement militaire pour leur cavalerie, tandis que les Autrichiens organisent une course entre Vienne et Budapest au 19^e siècle. L'endurance équestre comme discipline sportive reste pourtant un sport jeune. Elle voit le jour en 1966 avec la première course moderne, la Tevis Cup, couvrant 160km aux Etats-Unis. Toutes les compétitions internationales d'endurance sont organisées sous l'égide de la Fédération Equestre Internationale (FEI) depuis 1984. Le championnat du Monde d'endurance est organisé tous les deux ans dans un pays différent, et l'on compte davantage de pays s'engageant dans des compétitions internationales d'endurance, que dans les autres disciplines de la FEI. En France, après l'organisation d'un premier raid de 130km à Florac en 1975, l'endurance équestre connaît un tel essor qu'elle se place maintenant comme la deuxième discipline équestre après le CSO (Concours de Saut d'Obstacles) par son nombre de pratiquants et comme première discipline par les performances françaises au niveau international.

2. Les différentes épreuves d'endurance

En France, l'endurance équestre dépend de deux institutions : la Fédération Française d'Equitation (FFE) et la Fédération Equestre Internationale (FEI). Elle est soumise à leurs règlements.

A chaque épreuve correspond une distance de course et une vitesse (Tableau 1).

Tableau 1 : Nomenclature des épreuves françaises d'endurance (FFE 2013)

Divisions	Epreuves	Distance (km)	Vitesse (km/h)
Club	Club A	10	6 à 8

	Club A Relais	2 x 10	6 à 8
	Club Poney 4	10	8 à 10
	Club Poney 4 Relais	2 x 10	8 à 10
	Club 4	10	10 à 12
	Club 4 Relais	2 x 10	10 à 12
	Club 3	20	10 à 12
	Club 3 Relais	2 x 20	10 à 12
	Club 2	20	12 à 15
	Club 2 Spéciale	30	12 à 15
	Club 1	40	10 à 12
	Club Elite	40	12 à 15
	Club Elite GP	60	12 à 15
Amateur	Amateur 4	20	12 à 15
	Amateur 4 Spéciale	30	12 à 15
	Amateur 3	40	12 à 15
	Amateur 2	60	12 à 15
	Amateur 1	90	12 à 16
	Amateur 1 GP	90	Libre, 12km/h minimum
	Amateur Elite	130	Libre, 12km/h minimum
	Amateur Elite GP	160	Libre, 12km/h minimum

La pratique de l'endurance en compétition répond à des critères rigoureux de qualification. En endurance, un classement correspond à une épreuve terminée sans abandon, ni élimination, ni disqualification. Pour les épreuves internationales, les concurrents doivent non seulement avoir les compétences requises, mais également obtenir l'accord de l'entraîneur national pour participer.

3. Le déroulement de la course

Dans toutes les courses d'endurance, les concurrents suivent un parcours imposé et balisé, à allure libre. Selon le niveau de l'épreuve, la vitesse est limitée ou non. Ainsi, dans les courses de petit niveau (jusqu'à 90 km), les vitesses minimales et maximales sont imposées, alors que dans les courses de haut niveau, c'est-à-dire à partir de 90 km, seule la vitesse minimale (12 km/h) est imposée. Un couple qui s'écarte des vitesses imposées sera éliminé. Dans ces conditions, les courses se déroulent le plus souvent au trot et au galop. Le cavalier est autorisé à mettre pied à terre au cours du raid mais doit franchir les lignes de départ et d'arrivée à cheval. Il dispose de la carte vétérinaire du cheval, d'une carte du parcours et d'un carnet de bord, indiquant l'itinéraire, les points d'assistance, le balisage, les directions à suivre et les points de contrôle vétérinaire. Sur les points d'assistance

prévus par le comité organisateur, l'équipe d'assistance aide le cavalier à prendre soin de son cheval, à l'abreuver, à le rafraîchir et à le panser, pour l'aider à récupérer rapidement. La distance totale de la course est divisée en segments de 20 à 40 km, et les chevaux subissent à chaque étape un contrôle vétérinaire pour vérifier leur aptitude à poursuivre la compétition.

Le règlement officiel de la FFE prévoit la composition du pool vétérinaire. Le vétérinaire responsable du pool, membre de droit du jury, veille au bon déroulement des inspections et assure le rôle de conseiller technique du Président du jury. Pour les épreuves Club jusqu'à 30 kilomètres et les épreuves Club 3 Relais, le responsable des contrôles est un vétérinaire, le cas échéant, ou un enseignant d'équitation diplômé. Ce responsable est assisté par des enseignants tirés au sort parmi les enseignants qui encadrent les participants, avec un ratio de un vétérinaire ou un enseignant d'équitation diplômé pour 25 chevaux engagés. Pour les épreuves Club au delà de 30 kilomètres, les épreuves Amateur à vitesse imposée et les épreuves Amateur 1 Grand Prix, un vétérinaire doit être présent par tranche de 25 chevaux engagés et des étudiants vétérinaires peuvent intervenir sous la responsabilité du responsable du pool. Par ailleurs, un des vétérinaires est préalablement désigné pour assurer les soins, si nécessaire. Pour les épreuves Amateur Elite et Amateur Elite Grand Prix, un vétérinaire pour 20 chevaux engagés et un vétérinaire traitant doivent être présents.

4. Evolution de la discipline

A haut niveau, les vitesses de course en terrain montagneux n'ont pas réellement changé, alors que les vitesses en course sur terrain plat ont formidablement augmenté (Misheff, 2011) : l'équitation d'endurance s'est vue transformée en une véritable course. Le gagnant du Championnat du Monde en Malaisie en 2008 a parcouru 160 km à la vitesse moyenne de 18 km/h (5 m/s), de nuit, sous une pluie torrentielle et avec un taux d'humidité élevé. Un record du monde a été établi en 2008, avec 160 km courus en 6 heures, 28 minutes et 28 secondes, avec une vitesse moyenne sur la course de 24,71 km/h (6,86 m/s), et la dernière boucle de 19 km courue à la vitesse moyenne de 30,29 km/h (8,41 m/s). De façon encore plus marquée, on observe une augmentation des vitesses de course sur les épreuves de 120 et 100 km, avec des vitesses jusqu'à 36 km/h sur certaines étapes. Cette tendance est controversée du point de vue du bien-être des chevaux, puisqu'ils s'exposent aussi bien

à des blessures musculo-squelettiques se rapprochant de celles des chevaux de course de plat, qu'à de sérieuses anomalies métaboliques.

B. Les boiteries du cheval d'endurance

La boiterie est une pathologie dominante du cheval d'endurance, par la sollicitation intense de son système musculo-squelettique sur un effort prolongé et sur des terrains irréguliers (Nagy *et al.*, 2010). Les causes de boiterie sont souvent mal définies pendant les contrôles vétérinaires car l'examen locomoteur reste sommaire. La majorité de ces boiteries conduisent à l'élimination lors de l'épreuve mais se résolvent avec du repos, associé ou non à l'administration d'anti-inflammatoires (Holbrook, 2011).

La principale cause de boiterie du cheval d'endurance est la douleur en région métacarpienne proximale palmaire (Misheff, 2011), mais l'étiologie des boiteries reste toutefois variée.

1. Causes musculo-squelettiques (Misheff, 2011 ; Holbrook, 2011)

a. La douleur en région métacarpienne proximale palmaire

La douleur en région métacarpienne proximale palmaire est la première cause de boiterie chronique ou récidivante chez le cheval d'endurance. Son origine est le plus souvent une desmite proximale du suspenseur, qui se développe en général avec la fatigue survenant dans les dernières étapes de la course, en particulier sur un sol profond, mais qui constitue également une blessure courante à l'entraînement. La pathologie de stress de la partie palmaire proximale de l'os métacarpien III, par avulsion ou fracture de stress, est aussi une cause de douleur métacarpienne proximale palmaire. Périostite ou exostose de l'os métacarpien II ou IV sont beaucoup moins fréquemment observées.

b. Les problèmes de pied

Les problèmes de pied sont une cause courante de boiterie chronique ou récidivante. Ils concernent les quatre pieds, mais touchent plus régulièrement les antérieurs.

La gestion du pied du cheval, bien garni, bien équilibré et bien ferré, est primordiale, et un bon maréchal-ferrant participe pour beaucoup au succès d'une équipe d'endurance. Les chevaux d'endurance s'entraînant et concourant sur de très longues distances, l'équilibre du pied a un gros impact sur les structures de support du membre. De plus, de très nombreux chevaux d'endurance sont ferrés avec des plaques en gel de silicone le jour de la course.

Les bleimes (hématomes de la sole) apparaissent fréquemment sur les chevaux qui travaillent sur un sol dur. Leur gestion se fait par une protection et une réduction des chocs sur la sole par maréchalerie.

La douleur palmaire du pied est moins répandue chez les pur-sang arabes et les croisés arabes que dans les grandes races, mais peut toutefois survenir et être une importante cause de boiterie. Avec la plus large utilisation de l'IRM, des anomalies de la région naviculaire sont identifiées plus fréquemment.

Les chevaux d'endurance montrent souvent une inflammation de la bande coronaire dans les premières 24 heures après une compétition, qui peut être focale (dorsale le plus souvent) ou sur toute la circonférence de la couronne, et est généralement douloureuse à la palpation. Une séparation de la muraille du sabot et de la bande coronaire peut survenir, et est souvent accompagnée d'un pouls digital bondissant. Ces chevaux ne progressent généralement pas vers une fourbure typique.

Les chevaux d'endurance sont aussi sujets à la fourbure, qui peut être d'origine traumatique ou métabolique. Les symptômes deviennent apparents 24 à 72 heures après une course. La sévérité de l'atteinte est très variable, et les chevaux sans bascule de la troisième phalange sont généralement aptes à reprendre la compétition. Sur les chevaux considérés comme à risque après une compétition, comme ceux présentant une hémococoncentration sévère, une fatigue marquée, une rhabdomyolyse, un iléus ou une diarrhée, il est nécessaire de prévenir la fourbure par des bains continus des quatre membres dans l'eau glacée jusqu'au niveau du carpe.

c. Arthrose, capsulite, synovite et pathologie péri-articulaire des articulations métacarpophalangiennes et métatarsophalangiennes

L'arthrose des articulations métacarpophalangiennes et métatarsophalangiennes, comme la pathologie péri-articulaire, sont liées à des processus dégénératifs chroniques et associées au fait que les chevaux d'endurance peuvent concourir de nombreuses années. L'arthrose est bien plus observée au niveau de l'articulation métacarpophalangienne, mais peut survenir sur les membres postérieurs. Elle peut être associée ou non à une synovite et est plus souvent bilatérale.

d. Pathologie de stress de la partie distale de l'os métacarpien III ou de l'os métatarsien III

Les lésions répétées de surcharge sur les os peuvent conduire à des fractures induites par l'exercice. La plupart des fractures chez le cheval d'endurance démarrent au niveau des articulations métacarpophalangiennes et métatarsophalangiennes, avec comme site de prédilection le condyle latéral de l'os métacarpien III. L'IRM montre une fois encore son intérêt dans l'identification précoce de la pathologie de stress non visible radiographiquement. L'association d'une altération structurale de la surface articulaire et d'irrégularités ostéochondrales et sous-chondrales sur les condyles médial et latéral des os métacarpiens III ou métatarsiens III est potentiellement le reflet d'un cartilage traumatisé ou dégénératif et de lésions osseuses sous-jacentes, ce qui augmente le risque de fracture sur ces sites. Par ailleurs, les fractures condyliques de l'os métacarpien III ou métatarsien III, si elles ne sont pas déplacées, ne sont pas facilement diagnostiquées mais doivent être considérées comme une hypothèse probable dans le diagnostic différentiel de la boiterie aiguë du cheval d'endurance.

e. Tendinite du fléchisseur superficiel du doigt

La tendinite du fléchisseur superficiel du doigt peut être aiguë ou chronique, et de sévérité variable. Plus fréquente sur les antérieurs, une tendinite aiguë peut survenir de temps en temps pendant la course. Pendant l'entraînement, on peut observer relativement fréquemment une tendinite du fléchisseur superficiel du doigt, mais souvent non associée à une boiterie.

Les chevaux d'endurance avec une tendinite du fléchisseur superficiel du doigt ont traditionnellement un meilleur pronostic pour la reprise de la compétition que les chevaux qui courent à très grande vitesse sur une petite distance. Cependant, ce pronostic risque de s'assombrir dans le futur avec l'augmentation des vitesses pendant les courses d'endurance.

f. Myalgie paravertébrale et glutéale

La myalgie paravertébrale est due à un stress répété sur de longues distances et est exacerbée par un cavalier fatigué et instable. Les mouvements déséquilibrés du cheval contribuent également à l'instauration d'une fatigue musculaire, ce qui conduit souvent à une modification de la locomotion pour surmonter cette faiblesse. Dans un même temps, la fatigue du cavalier diminue ses capacités à soulager le dos de son cheval, même si un cavalier léger et expérimenté cause moins de chocs sur les muscles paravertébraux qu'un cavalier plus lourd, novice, manquant d'équilibre et avec une selle inadéquate. Un cheval avec une myalgie paravertébrale apparaît plus raide et tendu que boiteux, et il se tend à la palpation de la colonne vertébrale. Cette douleur peut également être compensatoire, secondaire à une boiterie ayant pour origine le tarse.

L'inflammation des muscles fessiers apparaît relativement fréquemment chez des chevaux qui fournissent un gros effort sur de longues distances. Les chevaux montrent un raidissement et un raccourcissement de la phase antérieure de la foulée et la pression sur les muscles fessiers superficiels et moyens déclenche une réponse douloureuse. La myosite des muscles fessiers et la rhabdomyolyse constituent une anomalie métabolique sérieuse (cf. ci-dessous).

Une sensibilité musculaire peut également être observée sur l'avant-main avec une atteinte du muscle brachiocéphalique, à l'origine d'une fatigue ou d'une boiterie antérieure.

g. Arthrose de l'étage distal du jarret

L'arthrose des articulations distales du tarse ou de l'articulation tarsométatarsienne est fréquente. Généralement, aucune effusion synoviale n'est palpable et le test de flexion globale est positif. Les chevaux avec une atteinte de l'étage distal du jarret (éparvin) présentent régulièrement, de façon concomitante, une douleur au niveau des muscles

paravertébraux et des pieds antérieurs ; la douleur podale serait à l'origine d'une altération de la locomotion, avec l'apparition secondaire des autres troubles.

h. Desmite du corps et des branches du ligament suspenseur du boulet

La desmite du corps et des branches du suspenseur s'accompagne généralement d'un épaissement de la région concernée. Elle est le plus souvent considérée comme un phénomène aigu, sévère et traumatique, apparaissant au cours de l'entraînement ou de la compétition, mais en général précédée à bas bruit d'une boiterie chronique discrète. Lorsqu'elle concerne les branches du suspenseur, la desmite est souvent unilatérale et accompagnée d'un œdème de la zone touchée.

i. Autres atteintes osseuses

La plupart des fractures résultent d'une accumulation de microtraumatismes osseux, encore aggravés en endurance par des terrains irréguliers qui modifient les charges auxquelles les os sont soumis. Ces fractures de stress sont susceptibles de devenir complètes si le cheval poursuit la compétition ou l'entraînement. Le vétérinaire doit donc identifier précocement ces fractures de stress.

Les atteintes osseuses les plus fréquentes chez le cheval d'endurance sont les fractures distales de l'os métacarpien ou métatarsien III, en particulier au niveau du condyle latéral, qui sont souvent traitées chirurgicalement. Dans une proportion plus faible, les fractures concernent la phalange proximale et sont le plus souvent complètes, qu'elles soient sagittales mais aussi comminutives. Leur traitement peut être chirurgical ou conservateur (plâtre ou repos). Plus rarement, on observe des fractures de stress du radius, de l'humérus ou de la scapula.

Sur les 38 chevaux d'endurance référés pour fractures et inclus dans l'étude de Misheff *et al.* (2010), 14 d'entre eux ont repris la compétition, 18 ont été réformés et 4 euthanasiés.

j. Myopathie d'effort

La myopathie d'effort, appelée aussi rhabdomyolyse ou myosite, provoque, certes, une boiterie, mais fait surtout partie du tableau plus large de la fatigue métabolique, et nécessite

un traitement urgent. Elle se manifeste par un raccourcissement de la foulée des quatre membres et peut s'accompagner de tremblements et d'une forte sudation. Elle est généralement observée pendant les toutes premières et les dernières étapes de la course.

2. Troubles métaboliques

La température centrale du cheval d'endurance augmente de 1 à 3°C pendant une course de plusieurs heures malgré les mécanismes de thermorégulation mis en œuvre, essentiellement la production et l'évaporation de la sueur (85%) et la respiration (15%). Ainsi, un cheval d'endurance de 450 kg courant à une vitesse de 16 km/h pendant 130 km peut perdre 5 à 10 % de son poids vif en sueur, soit de 20 à 40 litres (Marlin et Nankervis, 2002).

Cette déshydratation est à l'origine d'une hémococoncentration : ainsi, à l'issue d'une course de 140 km, l'hématocrite augmente de 23 à 25 % (Benamou-Smith *et al.*, 2006), ce qui, en diminuant la fluidité sanguine, réduit le transport de dioxygène aux tissus et l'élimination des déchets métaboliques. Ceci explique l'apparition de myosites, coliques et fourbures (Robert, 2009).

La sueur du cheval est hypertonique et particulièrement riche en ions sodium, potassium et chlorure. La production abondante de sueur crée donc un déficit électrolytique, avec le plus souvent hyponatrémie, hypokaliémie et hypochlorémie. Par ailleurs, l'hyperventilation du cheval en course est à l'origine d'une alcalose respiratoire. Ces modifications métaboliques peuvent entraîner des troubles de la contractilité des différents appareils et une vasoconstriction périphérique, d'où à nouveau myosites, coliques et fourbures, ainsi que des arythmies cardiaques et des affections telles que le flutter diaphragmatique (Langlois, 2006). Le flutter diaphragmatique correspond à des contractions diaphragmatiques liées à l'hypersensibilité du nerf phrénique à l'activité électrique du cœur et se manifeste par des spasmes de la région du flanc qui sont synchrones avec les battements cardiaques. Il constitue un motif d'élimination s'il est toujours présent après repos et réalimentation du cheval (Misheff, 2011).

Lorsqu'un épuisement des réserves en glucose et en glycogène se rajoute à ce tableau, on parle de syndrome d'épuisement, c'est-à-dire la combinaison d'un déficit volémique, de

troubles électrolytiques, acido-basiques et métaboliques ainsi que d'une déplétion totale des cellules en énergie (Thomas, 2010).

C. Jugement des boiteries par rapport au classement

1. Déroulement du contrôle vétérinaire

L'endurance équestre est donc un sport intense, tant pour le cavalier que pour sa monture, mais la santé du cheval compétiteur conditionne la poursuite de la course pour le couple (Misheff, 2011). Ainsi, les contrôles vétérinaires ont une part intégrale lors des événements d'endurance, et la poursuite de la compétition est soumise à la réussite de l'inspection vétérinaire initiale puis des examens suivant chaque phase de la compétition.

a. Règlement des épreuves d'endurance et classement des concurrents

Selon la catégorie d'épreuve, le règlement de la FFE diffère en matière de chronométrage de l'épreuve, de modalités de contrôle vétérinaire et du mode de classement (Tableau 2 et Tableau 3). Sur les épreuves se déroulant sur plusieurs jours, le règlement officiel (FFE, 2013) présente quelques particularités qui diffèrent des tableaux suivants.

Tableau 2: Règlement des épreuves Amateur 4, Amateur 4 Spéciale, Amateur 3, Amateur 2 et Amateur 1 (FFE, 2013)

	Amateur 4	Amateur 4 Spéciale	Amateur 3	Amateur 2	Amateur 1
Distance en km	20	30	40	60	90
Tolérance en km	18 à 22	28 à 32	35 à 45	55 à 65	85 à 95
Nombre d'étapes	1		2	2 ou 3	3
Vitesse	12 à 15 km/h				12 à 16 km/h
Mode de départ	Individuel ou par petits groupes				
Mode de contrôle intermédiaire	-		Arrêt du chronomètre à la ligne d'arrivée. Inspection vétérinaire dans les 30 minutes		
Temps de repos intermédiaire	-		1 heure		
Fréquence cardiaque intermédiaire	-		64 pulsations maxi / minute		
Fréquence cardiaque finale	64 pulsations maxi / minute				
Contrôle final	à 30 mn				

Mode de classement final	$\frac{((\text{Vitesse} \times 2) - \text{Vitesse mini}) \times 100}{\text{Fréquence cardiaque finale}}$
--------------------------	--

Tableau 3: Règlement des épreuves Amateur 1 GP, Amateur Elite et Amateur Elite GP (FFE, 2013)

	Amateur 1 GP	Amateur Elite	Amateur Elite GP
Distance en km	90	130	160
Tolérance en km	85 à 119	120 à 139 sur 1 jour	140 à 160 sur 1 jour
Nombre d'étapes	3 ou 4 si distance supérieure à 110km	4	5 ou 6
Vitesse	Libre (12 km/h minimum)		
Mode de départ	Un seul groupe		
Mode de contrôle intermédiaire	Vet-gate Inspection dans les 20 minutes – 2 présentations maxi		
Temps de repos intermédiaire	Amateur 1 GP : 1 ^{er} vet-gate : 40 min ; 2 ^e vet-gate : 50 min Amateur Elite, Amateur Elite GP : selon programme		
Fréquence cardiaque intermédiaire et finale	64 pulsations maxi / minute		
Contrôle final	Dans les 30 minutes		
Mode de classement final	Au chronomètre		

Le classement final est différent pour les épreuves à vitesse imposée et celles à vitesse libre.

Dans les épreuves à vitesse imposée, le mode de classement fait intervenir la valeur de la fréquence cardiaque finale du cheval : le couple classé premier ne sera pas forcément celui qui aura franchi la ligne d'arrivée en premier, mais bien celui qui aura parcouru la distance à la vitesse optimale tout en étant attentif à son cheval.

Dans les épreuves à vitesse libre, le classement final se fait selon l'ordre de franchissement de la ligne d'arrivée sous réserve du contrôle vétérinaire final et de la validation par le président du jury. Le chronomètre ne s'arrête qu'après la réussite du contrôle vétérinaire, dans les 30 minutes après passage de la ligne d'arrivée aux contrôles intermédiaires et au contrôle final. Le couple doit donc entrer dans le vet-gate dès que possible, car le temps d'attente est comptabilisé dans le temps de course, mais en attendant suffisamment, grâce à la surveillance de la baisse de la fréquence cardiaque du cheval, pour que ce critère ne soit pas éliminatoire.

b. Paramètres évalués lors du contrôle vétérinaire et critères d'élimination

Au cours du contrôle vétérinaire, l'examen vétérinaire doit permettre de déterminer si le cheval peut courir l'étape suivante. Le vétérinaire évalue les paramètres métaboliques, les éventuels signes de souffrance et la qualité des allures : il ne doit pas poser de diagnostic mais rechercher une altération de l'état du cheval par un faisceau de signes cliniques.

Les critères d'élimination sont répartis en deux groupes, les critères de type A, quantitatifs et directement mesurables, et les critères de type B, qualitatifs. Pour les critères de type A, soit la fréquence cardiaque, la fréquence respiratoire, le temps de réplétion capillaire, la durée de tenue du pli de peau et la température rectale, un seul vétérinaire suffit pour éliminer le couple cavalier-cheval. En revanche, deux vétérinaires de même avis sont nécessaires pour éliminer un couple en cas de critère de type B non conforme. Ces critères sont les signes jugés inquiétants par les vétérinaires, comme l'altération de l'état général ou du comportement, des bruits cardiaques anormaux, des troubles du rythme cardiaque, une couleur des muqueuses anormale, une boiterie, une blessure ... (Seguin, 2007).

i. Examen général du cheval

Le vétérinaire observe tout d'abord l'allure générale du cheval, l'état de son poil, son embonpoint et son état de vigilance, et se renseigne sur l'appétit, la soif et la miction. Il enregistre également toute plaie grave ou susceptible de s'aggraver au cours de la course, comme les plaies à la bouche ou au passage de sangle, qui peut devenir une cause d'élimination.

ii. Examen de la fonction cardiaque

L'examen de la fonction cardiaque est essentiel en endurance, car une élévation de la fréquence cardiaque sans normalisation reste le meilleur reflet d'un état d'épuisement ou de souffrance. L'auscultation cardiaque doit se faire dans le calme et sur une minute, pour un décompte de la fréquence cardiaque et une évaluation du rythme et d'éventuels bruits surajoutés. La fréquence cardiaque maximale autorisée est de 64 battements par minute. Au-delà, le cheval est éliminé.

iii. Examen de la fonction respiratoire

L'examen de la fonction respiratoire consiste en une évaluation de la fréquence respiratoire, non mesurée précisément si jugée normale, des mouvements respiratoires, de la dilatation des naseaux, d'un éventuel jetage ... Une polypnée doit entraîner une prise de température, suivie d'une élimination du couple si celle-ci est supérieure à 39,5°C.

iv. Couleur des muqueuses

La couleur des muqueuses est observée au niveau des muqueuses oculaires et gingivales, et doit être interprétée en association avec d'autres signes cliniques.

v. Temps de réplétion capillaire

Le temps de réplétion capillaire doit être inférieur ou égal à 2 secondes ; son augmentation permet de suspecter précocement une déshydratation.

vi. Persistance du pli de peau

Le pli de peau est réalisé au niveau de l'épaule, et sa durée de persistance notée : normalement, le pli ne devrait pas persister. Ce critère demeure peu fiable et très variable d'un cheval à l'autre selon l'état d'engraissement.

vii. Température rectale

La température rectale n'est pas prise systématiquement, mais utilisée sur des chevaux dont l'état général est suspect. Même en dehors d'un contexte de polypnée, une température supérieure à 39,5°C est éliminatoire.

viii. Examen de la fonction digestive

L'examen de la fonction digestive consiste en une auscultation des creux des flancs des deux côtés, en relation avec les observations des autres appareils. Même si l'effort peut entraîner un ralentissement du transit, une hypomotilité intestinale est aussi un signe précoce de fatigue et de déshydratation.

ix. Examen de la fonction nerveuse

L'examen de la fonction nerveuse du cheval est restreint à l'observation d'éventuels déficits pouvant être le signe de troubles métaboliques.

x. Examen de la fonction locomotrice

Enfin, l'examen de la fonction locomotrice commence par un examen statique du cheval, avec une observation de l'état de la ferrure, de l'état des pieds, un relevé des plaies éventuelles. Le cheval est ensuite présenté au trot, les rênes assez longues pour permettre un mouvement libre de la tête, sur un aller-retour de 40 mètres en ligne droite. Une boiterie est éliminatoire si elle est observable sur l'aller-retour, et aucun diagnostic n'est posé quant à cette boiterie. Si la commission vétérinaire ne peut pas se prononcer après cet examen, elle accorde le bénéfice du doute au cavalier qui pourra prendre le départ, tout en l'informant que son cheval est à risque afin qu'il l'arrête aux premiers signes de problème.

c. Les différents contrôles vétérinaires

i. Le contrôle initial

Le contrôle initial précède l'épreuve et il est effectué la veille ou le matin même. Le vétérinaire vérifie tout d'abord le livret signalétique, l'identification par transpondeur, les vaccinations et le passeport lors d'une épreuve internationale. L'examen clinique permet de vérifier que le cheval peut courir l'épreuve. Toute particularité à surveiller par la suite ou à différencier d'une pathologie, sera notée sur la carte vétérinaire du couple.

ii. Les contrôles intermédiaires

Le vétérinaire vérifie que l'état du cheval est stable et qu'il peut repartir pour l'étape suivante sans danger. Si l'examen du cheval est normal, le couple repart. Si l'animal présente un tableau clinique éliminatoire, il est présenté au président de jury pour être écarté de la course. Si l'examen est douteux, le jury disqualifie le couple ou laisse décider le cavalier tout en l'informant des risques, suite à un deuxième examen plus approfondi.

iii. Le contrôle final

Le contrôle final vise à déterminer l'état de fatigue dans lequel le cheval a terminé la course. En théorie, pour être qualifié, le cheval devrait être jugé capable de repartir sur une autre boucle.

Sur les petites épreuves, la fréquence cardiaque mesurée lors du contrôle finale est prise en compte dans le classement, l'objectivité du vétérinaire est donc primordiale.

Certains troubles peuvent apparaître après le contrôle final, comme les fourbures, les coliques... Les chevaux restent donc sous le contrôle de la commission vétérinaire une heure ou deux après la fin de la course, voire jusqu'au lendemain sur les épreuves de 140 km ou plus.

2. Boiterie et élimination

La boiterie est la première cause d'élimination en course d'endurance dans tous les pays, suivie des éliminations pour cause métabolique (Nagy *et al.*, 2010). D'après ces auteurs, elle représente 69,2% des éliminations et touche 31,8% des chevaux partants, sur une base de données de 91 courses de plus de 100 km dans 9 pays différents. Le nombre d'éliminations pour boiterie ou désordre métabolique est d'ailleurs dépendant du pays dans lequel a lieu la course et corrélé au nombre de chevaux partants, ce dernier nombre influençant peut-être la stratégie de course et donc la vitesse des participants. Robert *et al.* (2002) placent également la boiterie en tête des causes d'élimination, avec 45% des éliminations pour boiterie, sur des courses de 130 et 160 km courues en France. De plus, Marlin *et al.* (2008) relèvent une augmentation du taux d'élimination ces dernières années, sans mettre en évidence de facteurs de risque d'élimination.

3. Limites du contrôle vétérinaire

Malgré l'expérience des vétérinaires et le recours à plusieurs avis avant une élimination pour boiterie, l'examen locomoteur reste subjectif (Nagy *et al.*, 2010).

De plus, les allures du cheval sont modifiées par la fatigue. Ainsi, Riber *et al.* (2006) ont mis en évidence sur des chevaux non boiteux une modification de leur patron locomoteur au cours d'une course de 80 km. L'enregistrement de la locomotion de ces chevaux

pendant les trotting des contrôles vétérinaires montre en particulier une diminution de la vitesse moyenne, et des différences entre les membres antérieurs et postérieurs. De plus, Wickler *et al.* (2006) montrent une différence de patron locomoteur entre un cheval fatigué sur un tapis roulant ou lors d'une course d'endurance, sans toutefois définir si ces changements biomécaniques sont avantageux ou non en terme de bilan énergétique et de risque de blessure. Sur le tapis roulant où la vitesse est fixée, la fréquence de foulée diminue et la longueur de foulée augmente. Pendant une course d'endurance de 80 km, le cheval fatigué réduit sa vitesse en diminuant sa longueur de foulée, tout en maintenant la fréquence de sa foulée. D'après Munoz *et al.* (2006), l'asymétrie des chevaux augmente pendant la course indépendamment de leurs performances, et définir la limite entre boiterie discrète et fatigue en observant un cheval au trot reste très difficile.

D. Sélection des chevaux d'endurance

1. Profil du cheval d'endurance

A chaque discipline correspond un modèle de cheval avec des caractéristiques physiologiques, physiques et mentales particulières.

a. Races performantes en endurance

Le développement d'une race permet, par essence, une sélection et un perfectionnement de certaines qualités morphologiques ou locomotrices, en vue d'une utilisation particulière. Pour l'endurance, les races participant aux épreuves sont relativement hétérogènes car elles présentent chacune des avantages et des inconvénients selon la longueur de la course, la difficulté du parcours (dénivelé) et les conditions climatiques.

Le pur-sang arabe et ses croisements sont la race prédominante dans les épreuves à vitesse libre. En 2013, le pur-sang arabe occupe dans 62,1% des cas l'une des cinq premières places du classement en endurance en France, le demi-sang arabe 17,8% et l'anglo-arabe 9,3% (Buffet, 2013).

b. Age

L'entraînement du cheval d'endurance pour le haut niveau doit être commencé précocement pour permettre une adaptation physique et physiologique. En effet, un cheval de moins de 12 ans est plus souvent classé qu'un cheval plus âgé, même si la vitesse du cheval augmente avec son âge (Ricard et Touvais, 2005). Le meilleur niveau du cheval d'endurance est ainsi atteint entre 9 et 12 ans, en combinant sa vitesse et son taux de classement. Le taux de classement et la vitesse en course diminuent ensuite après 12 ans d'âge. Le nombre de départs en course est également un facteur favorisant d'abord l'élimination pour boiterie mais aussi pour cause métabolique.

c. Sexe

Dans de nombreuses disciplines, qu'elles soient destinées à l'homme ou au cheval, chaque sexe est classé séparément. Langlois *et al.* (1979) et Dubois (2007) mettent en évidence une supériorité en terme de vitesse chez les mâles pur-sang anglais de course par rapport aux hongres et aux juments. Les trotteurs mâles présenteraient également un avantage de temps, de record, de gains et de taux de classement sur les juments. En endurance équestre, les chevaux entiers sont moins performants notamment en terme de probabilité de classement, tandis que les hongres sont statistiquement les plus rapides en course (Ricard et Touvais, 2005).

d. Qualités mentales

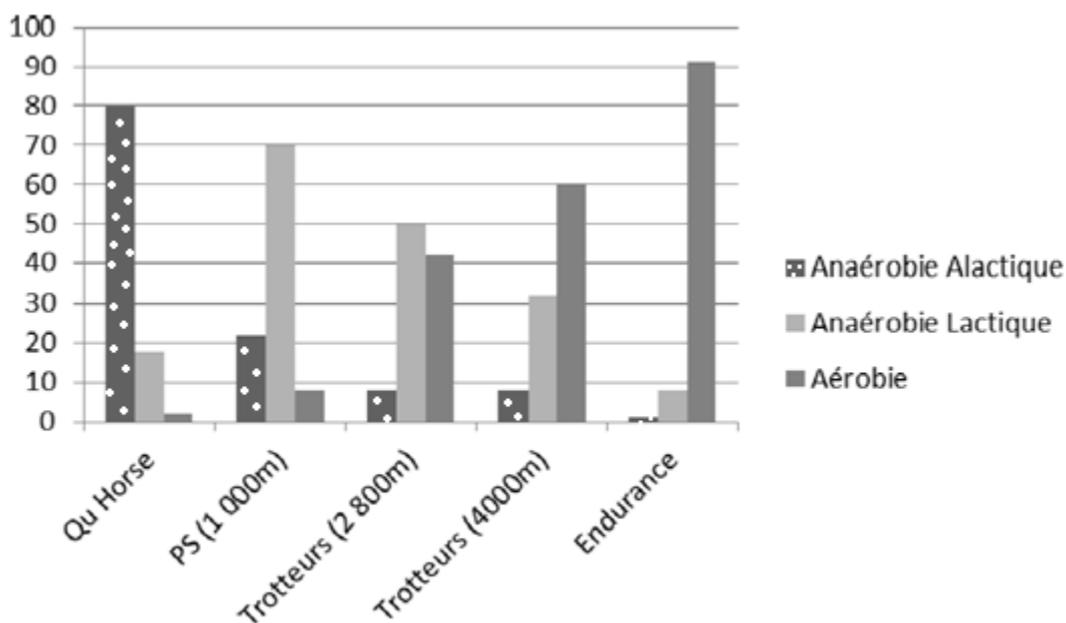
Le caractère du cheval, et en particulier sa volonté de coopérer avec le cavalier et d'apprendre, est corrélé avec sa carrière sportive. McBride et Mills (2012) tentent de définir les facteurs psychologiques liés à la performance pour différentes disciplines équestres. Le cheval d'endurance doit être volontaire, généreux et peu émotif, sans trop de sang, pour éviter de se fatiguer inutilement (Boudon, 2011). On préférera un cheval peu sensible au stress et dont la prise d'aliments et d'eau reste constante dans toutes les situations, permettant ainsi une bonne récupération après l'effort.

e. Qualités physiologiques

En fonction de la puissance du travail demandé, différents processus métaboliques sont impliqués pour assurer l'approvisionnement énergétique des muscles. L'Adénosine Triphosphate (ATP) qui est abondamment consommée dans la cellule musculaire pour

activer les myofibrilles et déclencher sa contraction doit être resynthétisée en permanence par trois voies métaboliques (Couroucé-Malblanc, 2011). La voie anaérobie alactique intervient immédiatement au début de l'effort (Figure 1) : elle fournit rapidement de l'énergie pour des efforts courts et intenses, comme ceux produits par les quarter horses. Ensuite intervient la voie anaérobie lactique, utilisée pour produire de l'énergie pour des efforts plus longs et moins intenses. Plus la distance de la course augmente, moins cette voie est utilisée. Enfin, la voie aérobie est réservée aux efforts de longue durée, comme les courses d'endurance.

Figure 1 : Participation relative des différentes voies métaboliques en fonction de la discipline équestre (Couroucé-Malblanc, 2011)



Les qualités physiologiques du cheval d'endurance découlent donc de l'utilisation de l'aérobiose. L'entraînement peut améliorer la capacité aérobie mais dans une certaine limite déterminée génétiquement (Barrey, 1992). Néanmoins, les vitesses lors des compétitions d'endurance étant de plus en plus élevées, elles nécessitent un certain degré de travail anaérobie. Lorsqu'une défaillance cardiorespiratoire survient, les cellules musculaires ne sont plus correctement approvisionnées en dioxygène, et la voie anaérobie se met alors en place. Le développement d'une plus grande capacité de stockage du glycogène, des enzymes glycolytiques, et du métabolisme du lactate contribue à l'utilisation de cette importante source d'énergie améliorant la performance (Meyrier, 2003).

Chez le cheval, la capacité du métabolisme aérobie est très développée grâce à la conjonction d'une consommation de dioxygène maximale élevée (jusqu'à 175 mL/min/kg chez le pur-sang, d'après Barrey en 1992), d'un transport et d'une extraction très efficaces du dioxygène. A l'échelle de l'organisme, l'intensité du métabolisme aérobie peut être appréciée par la détermination de la consommation d'oxygène (VO₂ exprimée en L/min) et plus particulièrement de la VO₂ max qui estime la puissance maximale d'origine aérobie que peut soutenir le cheval. En médecine humaine, la valeur de la VO₂ max observée chez un athlète est d'autant plus élevée qu'il est apte à soutenir un effort intense et prolongé. La VO₂ max dépend du débit cardiaque, des capacités de l'appareil respiratoire et de la concentration en hémoglobine dans le sang (Barrey, 1992). En effet, Fraipont *et al.* (2011) mettent en évidence des maladies subcliniques, le plus souvent associées à d'autres troubles concomitants, sur 38 chevaux d'endurance présentés pour contre-performance au CIRALE. Parmi ces chevaux, 85,2% souffrent d'une affection de l'appareil respiratoire inférieur (essentiellement une inflammation des voies aériennes, IAD). Par ordre de fréquence décroissant sont ensuite observés des troubles musculo-squelettiques puis des arythmies cardiaques.

L'intégrité de l'appareil respiratoire est donc essentielle à la production d'un effort. En effet, à l'effort, le cheval augmente sa ventilation de moitié et sa consommation de dioxygène est multipliée par 30.

Les chevaux performants en endurance présentent également des caractéristiques au niveau cardiaque. Même si certains présentent des dispositions naturelles par une faible fréquence cardiaque au repos, celle-ci n'est nullement prédictive de la qualité de la récupération cardiaque (Caumont, 1998), la question de l'entraînement restant déterminante. La fréquence cardiaque après l'effort doit retrouver rapidement sa valeur au repos. D'après Robert *et al.* (2002), le taux d'élimination à l'arrivée est significativement plus élevé chez les chevaux avec une fréquence cardiaque supérieure à 60 battements par minute lors du contrôle vétérinaire avant la dernière étape sur des courses de 130 et de 160 km.

Au cours de l'effort d'endurance se produisent des modifications hématologiques, en particulier une augmentation de l'hématocrite par splénocontraction (Couroucé-Malblanc, 2011). Au cours d'une course de 160 km très technique par les terrains et la chaleur, Barnes *et al.* (2010) ont montré qu'un poids corporel plus faible avant la course était prédictif d'une élimination pour cause métabolique, et que les chevaux éliminés pour

raison métabolique présentait au milieu de la course une plus grande augmentation d'hématocrite que les chevaux classés.

Du point de vue musculaire, rappelons que le muscle est composé de différents types de fibres musculaires, les fibres lentes de type I et les fibres rapides de type II, soit IIA et IIX. Les fibres musculaires de type I, à contractions lentes, sont capables de se contracter un grand nombre de fois mais avec une force modérée. Elles utilisent un métabolisme uniquement aérobie qui consomme plus particulièrement les acides gras. Ces fibres sont donc utilisées pour des efforts longs et modérés comme l'endurance. Les fibres rapides IIA, par le biais de la glycolyse aérobie, peuvent fournir des contractions rapides et plus puissantes que les fibres de type I, tout en restant relativement résistantes à la fatigue. Elles représentent la performance qui combine endurance et vitesse. Enfin, les fibres IIX, très rapides et peu résistantes à la fatigue, utilisent la voie anaérobie. Elles sont à l'origine des efforts rapides et puissants. Les chevaux arabes sont génétiquement plus adaptés à l'endurance (Lopez-Rivero *et al.*, 1989), avec une forte proportion de fibres I et un rapport IIA/IIX élevé (Rivero *et al.*, 2001). Cependant, l'entraînement d'endurance peut être à l'origine d'une adaptation du muscle squelettique, avec une transformation des fibres IIX en IIA et l'amélioration des capacités aérobies (Rivero *et al.*, 1995 ; Prince *et al.*, 2002). Enfin, pour être efficace, le système musculo-squelettique du cheval d'endurance doit être globalement intègre.

La condition physique d'un cheval d'endurance peut être évaluée par des tests à l'effort, en particulier avec la mesure de la VLA4 (vitesse à laquelle la lactatémie atteint 4 mmol/L) mais aussi de la V160 (vitesse à laquelle la fréquence cardiaque atteint 160 battements par minute), sur le terrain ou sur tapis roulant. Fraipont *et al.* (2012) montrent des valeurs de ces paramètres plus élevées pour les chevaux participant à des courses d'au moins 120 km que pour les chevaux de course de niveaux inférieurs.

f. Qualités physiques

i. Morphologie

Parmi les chevaux qui réussissent au plus haut niveau, la diversité de modèles est frappante : il n'existe pas un modèle, ni un type d'origine, caractéristiques du cheval d'endurance. Cependant, on peut dégager des points communs à la plupart d'entre eux, qui ne correspondent d'ailleurs pas forcément aux critères classiques de beauté.

Le cheval d'endurance doit être léger, sans excédent de masse grasseuse, mais sans être trop maigre (Boudon, 2011). Lawrence *et al.* (1992) montrent que les chevaux les plus performants parmi les 61 chevaux d'une course de 150 miles ont un plus faible pourcentage de tissu adipeux et une note d'état corporel inférieure. Même si Ménager (2010) ne met pas en évidence de relation significative entre le poids des 203 chevaux étudiés et leurs performances sur la course, elle montre que les individus éliminés présentent une note d'état corporel (5,46) plus élevée que les classés (5,20) mais de façon faiblement significative ($p < 0,1$), sur l'échelle de Henneke (de 1 à 9). Cependant, en utilisant cette même échelle de notation, Garlinghouse et Burril (1999) remarquent, sur des courses de 160km, une augmentation de la distance parcourue corrélée à une note d'état corporel plus élevée, parmi 360 chevaux notés de 1,5 à 5,5. Ainsi, pour exprimer de façon optimale leur potentiel en endurance, les chevaux doivent présenter un état corporel moyen, puisque les individus avec la plus grosse épaisseur de tissu adipeux montrent des capacités de thermorégulation réduites et que les plus maigres manquent de réserves en substrats énergétiques pour accomplir un effort d'endurance.

De plus, le cheval d'endurance est plutôt fin, sans masse musculaire proéminente, et de petite taille (Boudon, 2011 ; Metayer *et al.*, 2004). L'encolure joue un rôle de balancier essentiel dans le galop du cheval d'endurance, et doit donc être assez longue sans pour autant surcharger l'avant-main (Caumont, 1998). L'inclinaison de l'épaule doit être la plus horizontale possible pour économiser de l'énergie lors du déplacement longitudinal. Le cheval d'endurance présenterait également un dos assez court, avec un garrot saillant, et un bassin incliné pour faciliter l'engagement des postérieurs au galop (Metayer *et al.*, 2004), qui s'accompagne d'une hanche ouverte, d'un fémur long et d'un jarret fermé (Barrey, 2003). On attend d'un cheval d'endurance des membres plutôt courts et solides et des

articulations larges, avec de bons aplombs et de bons pieds. Selon Misheff (2011), un cheval avec une mauvaise conformation ne doit pas être utilisé pour l'endurance car il ne pourra être compétiteur qu'à court terme ou à bas niveau.

ii. Locomotion

Chez le cheval d'endurance, il ne faut pas rechercher de belles allures selon les critères classiques car seule compte l'économie d'énergie. Les bonnes allures d'endurance sont symétriques, régulières, rasantes et peu relevées (Caumont, 1998).

Le cheval d'endurance présente des foulées rapides au trot. Au galop, sa forte propulsion longitudinale s'accompagne d'une activité dorso-ventrale limitée, avec une cadence importante (Barrey, 2003). Le déplacement des membres doit se faire dans l'axe car les chevaux qui billardent ou qui harpent, se fatiguent inutilement.

Le profil idéal du cheval d'endurance n'est donc pas complètement défini ; il apparaît comme multifactoriel et subjectif. Les indices de performance en endurance et les indices génétiques ont été développés par l'INRA et l'IFCE afin de quantifier les performances et l'aptitude en endurance. Ces indices sont des outils d'aide à la sélection des chevaux.

2. Indices de performance et indices génétiques (ACA, IFCE)

La sélection vise à l'amélioration génétique de caractères permettant une augmentation de la performance pour une discipline ou pour une race (Verrier, 2011). Dans ce but, les éleveurs pratiquent un choix raisonné des accouplements, à partir d'informations sur les reproducteurs. A la demande des éleveurs de chevaux d'endurance, représentés par l'Association du Cheval Arabe (ACA), les Haras nationaux puis l'Institut Français du Cheval et de l'Équitation (IFCE), en collaboration étroite avec l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), ont mené à leur terme les calculs d'indices de performance et génétiques pour la discipline de l'endurance. Même si ce concept existe depuis 1972 en Concours de Saut d'Obstacles et en Concours Complet d'Équitation, les premiers indices de performance, calculés sur les performances enregistrées par la

Fédération Française d'Equitation (FFE) de 2002 à 2005, sont parus en 2006. Il s'agit d'indices « de carrière », publiés annuellement, qui prennent en compte toutes les performances disponibles depuis 2002 ; ainsi, les indices de carrière 2002-2012 sont maintenant disponibles via l'ACA et sont calculés à partir des performances en course à vitesse libre de 90 km et plus de 2002 et 2012 en France.

a. Critères utilisés

Les indices sont historiquement calculés à partir des résultats des compétitions enregistrés par la FFE (base FFE Compet) puis transmis à la base de données de l'IFCE, le SIRE (Système d'Information Relatif aux Equidés), et enfin à l'INRA. Depuis 2011 s'y ajoutent des données issues de la base de la Fédération Equestre Internationale (FEI), pour les cavaliers étrangers montant en France des chevaux français. Les performances des chevaux français dans des compétitions internationales à l'étranger ne sont pas encore intégrées dans le calcul des indices.

Les trois critères retenus pour le calcul de l'indice de performance sont :

- La vitesse : elle n'intervient directement dans le classement que pour les épreuves à vitesse libre. Les épreuves à vitesse imposée sont donc écartées. Pour chaque cheval, sa vitesse absolue n'est pas utilisée mais on retient la comparaison de cette vitesse à celle des autres chevaux classés sur la même course. En outre, cette vitesse est corrigée par le niveau moyen des autres chevaux de chaque course. Ainsi, la difficulté de la course et la qualité de la concurrence se trouvent prises en compte ;
- Le classement : ce critère indique si le cheval a terminé ou non l'épreuve (élimination, abandon...). Il n'existe pas de pondération entre les causes de non-classement. On procède néanmoins à des corrections sur le niveau de difficulté de l'épreuve, révélé par le taux de chevaux classés, et sur le niveau de la concurrence ;
- La distance : lorsqu'elle est disponible, c'est la distance réelle de l'épreuve qui est retenue. Pour les épreuves dites « de 90km », c'est cette distance qui a été enregistrée forfaitairement jusqu'en 2008. Pour les courses disputées sur plusieurs jours, il est attribué une équivalence : par exemple, une « 2 fois 80 » équivaut à une 120 km. Enfin, pour accorder plus d'importance aux championnats internationaux

(d'Europe open et du Monde), la distance prise en compte pour ces épreuves est forfaitairement portée à 200 km, augmentant ainsi l'indice élémentaire « distance » et, par conséquence, l'indice combiné.

Les indices sont ensuite corrigés pour intégrer les effets de l'âge et du sexe. En effet, les jeunes chevaux courent moins vite mais sont classés plus souvent que les chevaux plus âgés. De plus, les chevaux entiers sont statistiquement moins performants que les hongres. Certains hongres dont la castration n'a pas été déclarée au SIRE bénéficient cependant de cette correction.

b. Indice de performance global

Chacun des trois critères retenus (vitesse, classement, distance) donne lieu à un indice élémentaire, auquel est associé un coefficient de précision (CP) qui tient compte du nombre de performances et de la répétabilité des critères. Ce CP est compris entre 0 et 1, et la précision de l'indice augmente lorsque le CP s'approche de 1.

L'indice global est alors calculé à partir de ces indices élémentaires, en tenant compte des corrélations existant entre eux, et en appliquant pour chacun une pondération. En 2012, cette dernière passe à 35% pour la vitesse, 30% pour le classement et de 35% pour la distance, contre respectivement 30%, 30% et 40% précédemment.

L'indice de performance annuel est calculé mais non publié du fait du très faible nombre de sorties annuelles en compétition d'endurance, deux fois par an en moyenne à haut niveau (Ricard *et al.*, 2005).

L'indice de performance global, ou indice « de carrière », ou encore Indice de performance en Raid d'Endurance (IRE), est présenté de façon à ce qu'approximativement 50% des chevaux aient un indice supérieur à 100, 30% supérieur à 110, 17% supérieur à 120, 7,5% supérieur à 130 et 2,8% supérieur à 140. Sur la période 2002-2011, 7 363 chevaux sont indicés, ce qui représente 38 473 sorties en compétition pour 23 779 classements.

Certains indices de performance, non significatifs, ne sont pas publiés sur le SIRE, à la demande de l'ACA : les chevaux qui n'ont jamais été classés mais qui sont sortis sur des distances élevées, avec un indice pourtant supérieur à 100, et les chevaux n'ayant couru qu'une fois et non classés, avec un indice inférieur à 100.

c. Indice génétique ou BRE (« indice génétique (BLUP) pour la discipline des Raids d'Endurance »)

D'après Barrey (1992), la performance chez le cheval comporte une part d'héritabilité. Elle est évaluée à 25% pour les courses de trot, 35% pour les courses de galop et 15 à 25% en concours hippique. Les indices génétiques ou BLUP (Best Linear Unbiased Prediction) permettent d'estimer la valeur génétique d'un cheval dans un but de sélection et d'amélioration génétique de la race, par le biais d'accouplements raisonnés. Les indices génétiques sont calculés annuellement par l'INRA et prennent en compte les performances du cheval dans une discipline donnée ainsi que celles de ses apparentés.

Le BLUP est exprimé en points positifs et négatifs : un cheval améliorateur aura un BLUP positif. Toutefois, la valeur du BLUP est toujours accompagnée d'un coefficient de détermination représentant la précision du calcul.

Le calcul des indices génétiques en endurance, à partir des indices annuels de 2002 à 2011, a été rendu possible en 2012 et utilise les corrélations évoquées pour le calcul de l'indice de performance.

Certains chevaux n'ayant jamais pratiqué l'endurance ont un indice génétique endurance par leurs apparentés, avec un CP très faible. Dans ce cas, l'ACA a décidé de ne pas diffuser ces indices.

Sur le site de l'IFCE sont diffusés les catalogues précisant les indices génétiques des étalons Arabe et Shagya ayant sailli au moins 20 femelles depuis 1997, de tous les étalons Arabe et Shagya pour lesquels un carnet de monte a été demandé en 2012 et dont l'indice génétique a un CP supérieur ou égal à 0,10, et des juments de toutes races nées après 1990, ayant un indice génétique supérieur à 10 avec un CP supérieur ou égal à 0,10.

L'indice génétique permet de distinguer les jeunes reproducteurs avant les premières performances. Ainsi, certains jeunes étalons particulièrement intéressants sont promus par l'ACA, ce qui favorise leur testage précoce sur descendance.

II. Méthodes d'étude de la locomotion et de caractérisation des boiteries

A. Evaluation subjective de la locomotion du cheval

1. Examen clinique locomoteur

La boiterie est un motif fréquent de consultation en pratique vétérinaire équine.

La première étape de l'examen locomoteur consiste à recueillir l'historique du cheval ainsi que l'anamnèse. Vient ensuite l'examen du cheval comprenant son examen à distance, son examen clinique et son observation en mouvement (Mourra, 2012), complétés ensuite par des investigations supplémentaires au niveau des zones suspectes.

a. Déroulement classique de l'examen dynamique

L'examen du cheval se fait en main, sa tête et son encolure étant laissées libres de mouvements, avec un filet ou un mors chifney pour plus de sécurité. Le cheval doit être ferré depuis quelques temps pour éviter une sensibilité trompeuse du pied. L'observation d'une boiterie est plus facile en période de travail.

Le vétérinaire doit pouvoir observer le cheval aussi bien sur une surface dure et plane, non glissante, que sur une surface souple et plane, pas trop profonde. De façon générale, les sols durs ont tendance à exacerber les boiteries consécutives à une lésion des tissus durs alors que les surfaces meubles amplifient celles des tissus mous.

Dans un premier temps, le cheval est observé sur un aller-retour au pas puis au trot sur sol dur en ligne droite, de face, de dos et de profil. Doivent être évalués le placement des membres, l'amplitude de la foulée (et sa décomposition en différentes phases de protraction, soutien et rétraction de chaque membre), la descente du boulet, les amplitudes de mouvement de chaque articulation ainsi que les mouvements de la tête. Le rythme découlant du poser des membres sur le sol peut être un élément intéressant à écouter. Le cheval est ensuite mis sur un cercle sur sol dur au pas et au trot, au départ sur grand cercle dont le diamètre est réduit progressivement afin d'exacerber des gênes éventuelles. Faire évoluer le cheval sur un huit de chiffre au pas sur sol dur permet d'évaluer ses capacités

proprioceptives et coordinatrices. Enfin, le cheval est mis au trot et au galop sur un cercle sur sol souple aux deux mains, pour évaluer les mouvements du dos et observer le cheval à vitesse plus élevée, et sur une allure asymétrique pour le galop. Le test du surfaix peut également être réalisé afin de mettre en évidence certaines dorsalgies ou de modifier les caractéristiques d'une boiterie. Il est aussi possible d'évaluer le cheval sur une pente dans le but d'apprécier les mouvements du dos ou d'exacerber certaines boiteries. Le cheval peut être observé monté, afin de recréer les conditions de travail, comme l'observation du cheval sur la piste pour évaluer la présence de troubles locomoteurs à grande vitesse.

b. Reconnaissance d'une boiterie

Une boiterie antérieure est en général plus facile à reconnaître qu'une boiterie postérieure. Il est fondamental d'observer les mouvements de la tête et de l'encolure : un cheval boiteux d'un membre antérieur élèvera la tête au moment du poser du membre atteint et l'abaissera au poser du membre controlatéral sain. Une boiterie thoracique bilatérale se manifestera par un report du poids sur l'arrière-main ainsi qu'une élévation constante de la tête.

Pour évaluer une boiterie postérieure unilatérale, il faut observer attentivement l'amplitude de mouvement des hanches, avec une amplitude augmentée du côté atteint. Cela se manifeste également par une élévation verticale du bassin lors du poser du membre boiteux, et une descente verticale du bassin lors du poser du controlatéral sain. Une boiterie postérieure bilatérale se manifestera plutôt par un défaut d'engagement des membres pelviens.

La descente du boulet, diminuée sur le membre atteint afin de limiter le poids sur ce membre, est un indice qui peut éventuellement être évalué plus facilement sur des vidéos.

Les sons produits par le déplacement du cheval peuvent également alerter sur une boiterie. Un cheval boiteux aura tendance à poser son membre sain plus fortement que son controlatéral boiteux ce qui se traduit par un bruit plus sourd si le cheval est ferré et évolue sur une surface plane et dure. L'écoute de la régularité du rythme est également utile et permet de déceler les disparités.

Les boiteries sont généralement plus visibles sur le cercle, compte tenu d'une augmentation des forces en compression et en extension appliquées sur les membres. Il est donc intéressant de mettre le cheval sur le cercle aux deux mains sur sol dur (pas, trot) et

souple (pas, trot, galop). Au niveau du membre antérieur, les affections localisées depuis le boulet jusqu'au pied auront tendance à être accentuées lorsque le membre sera en position interne. A l'inverse, les lésions de suspenseurs, les atteintes du carpe ou du canon sont souvent amplifiées lorsque le membre est à l'extérieur du cercle. Enfin, la majorité des atteintes du membre postérieur auront tendance à mieux ressortir lorsque celui-ci est en position interne du cercle, même si les lésions du suspenseur pourraient être amplifiées lorsque le membre est en position externe.

Les effets compensatoires d'une boiterie primaire peuvent induire l'observateur en erreur (Keegan, 2007). Ainsi, une boiterie apparente sur les membres antérieur et postérieur d'un même côté doit évoquer avec une forte probabilité une boiterie postérieure primaire entraînant une fausse boiterie antérieure compensatrice. Une boiterie observable sur un bipède diagonal peut provenir d'une boiterie antérieure primaire ou effectivement d'une boiterie des deux membres diagonaux.

c. Gradation de la boiterie

La gradation de la boiterie, bien que pas totalement objective, permet d'effectuer un classement, de quantifier les éléments observés et de suivre l'évolution de la boiterie sur un même cheval. Il existe différentes échelles de notation, mais la plus répandue est celle de l'AAEP (American Association of Equine Practitioners) qui grade les boiteries de 1 à 5 (Keegan, 2007). Le grade 0 correspond à un cheval sain, sans boiterie perceptible dans aucune circonstance. Pour le grade 1, la boiterie est difficile à observer ou rarement visible quelles que soient les circonstances. Le grade 2 correspond à une boiterie légère, difficile à observer au pas et au trot en ligne droite mais apparente dans certaines conditions. Le grade 3 définit une boiterie modérée visible au trot dans toutes les circonstances. Quant au grade 4, il note une boiterie sévère, visible au pas et au trot, avec un mouvement de tête ou de hanche marqué, ou avec un raccourcissement de la foulée. Enfin, le grade 5 correspond à une suppression d'appui ou un appui minimal au repos et en mouvement, ou une incapacité à se déplacer.

d. Avantages et inconvénients de l'examen clinique locomoteur

Bien que la majorité des praticiens utilise la notation AAEP pour grader les boiteries, leur évaluation est subjective. En effet, chaque grade (sauf le grade 5) correspond à différents critères et dépend donc de ce que l'examineur regarde et de son habilité d'observation.

La limite entre les différents grades est donc floue (Keegan, 2007). De nombreux praticiens utilisent avec cette même échelle des gradations de 0,5 pour tenter de gagner en précision.

Keegan *et al.* (1998) ont proposé une évaluation sur tapis roulant de 24 chevaux, avec une boiterie légère à modérée, au trot, à 6 vétérinaires expérimentés et à 7 vétérinaires internes ou résidents. Parmi les « experts », la détection d'une boiterie antérieure et l'identification du membre boiteux présentent une bonne répétabilité (concordance intra-observateur). Cette concordance est acceptable au sein du groupe des vétérinaires non-expérimentés. La reproductibilité, donc la concordance entre les différents évaluateurs, est faible. L'expérience de l'observateur augmente donc la répétabilité du jugement d'une boiterie sans pour autant influencer sur la véracité des résultats. Keegan *et al.* (2010) explorent la subjectivité de cet examen locomoteur sur 131 chevaux avec différents cliniciens expérimentés chargés de déterminer, pour chaque cheval, si un membre donné est boiteux ou non suite à un trotting aller-retour en ligne droite, et le grade de boiterie de chaque membre après examen locomoteur complet (trotting, longe et tests de flexion). Pour les boiteries discrètes d'un grade inférieur ou égal à 1,5, l'accord entre les évaluations des différents cliniciens (reproductibilité) est mauvais, avec une valeur de 61,9% contre 93,1% pour les boiteries de grade supérieur à 1,5. De plus, cette reproductibilité, quelle que soit la gravité de la boiterie, n'est pas améliorée par l'examen à la longe et les tests de flexion, par rapport à un aller-retour en ligne droite au trot. Toutefois, les évaluations des différents cliniciens sont plus proches lorsque ces derniers assistent *de visu* à l'examen, par rapport aux études dans lesquelles les vidéos des chevaux servent de support à l'évaluation de la boiterie.

Par la comparaison entre les mesures cinématiques objectives des mouvements de la tête, des membres et des pieds, et les évaluations subjectives des différents observateurs, Keegan *et al.* (1998) expliquent la faible reproductibilité de l'examen locomoteur par l'observation de critères différents selon les différents intervenants. Hewetson *et al.* (2006) confirment cette hypothèse par l'utilisation de deux échelles de gradation des boiteries, l'une avec un score numérique de 0 à 5 et l'autre, verbale, avec des adjectifs pour décrire la boiterie : entre ces deux échelles, une fiabilité seulement modérée est observée avec 16 vétérinaires expérimentés. Selon Merkens et Schamhardt (1988, a), seule l'utilisation d'un score global qualifiant l'évolution d'un même cheval (boiterie aggravée, stable, améliorée ou disparue) fournit une bonne concordance entre différents évaluateurs. De plus, le grade

de boiterie attribué à un cheval à un moment donné est influencé par le fait que l'évaluateur sait ou non qu'une anesthésie diagnostique a été pratiquée, ce qui constitue un autre biais (Merkens et Schamhardt, 1988, b).

Ainsi, toutes ces études parviennent au consensus suivant : l'évaluation subjective d'une boiterie par un seul individu ne devrait pas être la méthode de référence si on s'intéresse à la sévérité de la boiterie. Toutefois, pour gagner en fiabilité, même si la précision diminue, on pourrait utiliser une valeur moyenne des notes de plusieurs évaluateurs (Keegan, 2007).

Enfin, cette méthode d'évaluation de détection des boiteries a l'avantage d'être peu onéreuse et de ne pas demander de matériel spécifique.

2. Epreuve d'élevage (d'après l'Association du Cheval Arabe)

L'ACA, soutenue par le ministère de l'agriculture, a créé le Programme d'Élevage Endurance (PEE) en 2005 pour développer la sélection des chevaux orientés vers l'endurance, et non celle d'une race en particulier. Ainsi, tous les chevaux destinés à l'endurance sont potentiellement inscriptibles au PEE, quelle que soit leur race, malgré certaines conditions pour les chevaux d'Origine Non Constatée (ONC) et d'Origine Constatée (OC).

Le PEE accompagne l'intégralité de la filière des chevaux d'endurance et a pour objectif d'orienter la sélection, d'améliorer les conditions techniques et pratiques d'élevage, de favoriser la mise en valeur des produits et de promouvoir leur commercialisation. Dans ce but, les Groupements d'Éleveurs de Chevaux d'Endurance (GECE), soutenus par l'IFCE, organisent des concours d'élevage à orientation d'endurance, auxquels participent des chevaux inscrits au PEE, soit de jeunes chevaux de 2 et 3 ans, des poulinières saillies ou suitées âgées de 4 à 18 ans. L'IFCE reverse des primes aux participants suivant leurs notes. L'organisation de ces concours d'élevage se fait à l'échelle locale, régionale et enfin nationale.

Les concours d'élevage d'endurance sont destinés à améliorer la commercialisation des produits et la connaissance du modèle et des allures des reproducteurs. Dans ces concours « modèle et allures », les chevaux, présentés en main, sont jugés sur leur morphologie et

leur locomotion. Le jury, composé au minimum de trois juges, évalue les chevaux en utilisant une grille de pointage élaborée et validée par l'ACA (Figure 2). Cette grille comporte trois parties : l'« expression d'ensemble », « le modèle » et « les allures » du cheval. L'expression d'ensemble correspond à l'œil, les proportions, le sang, le « look » et la sérénité du cheval. Est ensuite jugé le modèle, caractérisé par l'arrière-main, l'avant-main, les membres et les pieds, et les tissus. Enfin, les allures sont notées : la symétrie et la rectitude sont évaluées en main au pas et au trot, ainsi que l'aisance, l'amplitude et l'énergie naturelle du cheval. Pour chaque critère est attribuée une note de 0 à 10 (10 reflétant l'excellence). La note finale, sur 100 points, tient compte des coefficients de pondération encourageant certaines qualités jugées essentielles à l'endurance, comme pour l'arrière-main, les membres et les pieds, et l'amplitude des allures.

Figure 2 : Grille de jugement pour les concours d'élevage à orientation endurance (ACA)

CONCOURS D'ELEVAGE A ORIENTATION ENDURANCE 2 et 3 ans									
Nom du Juge :									
N° Dos. :									
Nom du cheval :	Age :								
POINTS EXPRESSION D'ENSEMBLE :	<input type="text" value="0"/> /60								
POINTS MODELE:	<input type="text" value="0"/> /100								
POINTS ALLURES:	<input type="text" value="0"/> /80								
TOTAL GENERAL	<input type="text" value="0"/> /240								
note sur 100	<input type="text" value="0"/>								
<u>Commentaires :</u>									
Points forts		Points faibles							
1 - EXPRESSION D'ENSEMBLE DU CHEVAL D'ENDURANCE									
<u>TOTAL sur 60 points</u>		<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <th>NOTE de 0 à 20</th> <th>COEF</th> <th>TOTAL</th> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"> </td> <td style="text-align: center;">3</td> <td style="text-align: center;">0</td> </tr> </table>	NOTE de 0 à 20	COEF	TOTAL		3	0	
NOTE de 0 à 20	COEF	TOTAL							
	3	0							
2 - MODELE									
		<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <th>NOTE de 0 à 20</th> <th>COEF</th> <th>TOTAL</th> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"> </td> <td style="text-align: center;">1</td> <td style="text-align: center;">0</td> </tr> </table>	NOTE de 0 à 20	COEF	TOTAL		1	0	
NOTE de 0 à 20	COEF	TOTAL							
	1	0							
Arrière-main (bassin, croupe, cuisse, liberté de la queue)		1	0						
Avant-main (épaule, encolure, poitrine, garrot)		1	0						
Ligne de dessus Transmission		1	0						
Membres (dans leur ensemble: articulations, aplombs)		1	0						
Pieds Forme du sabot, taille, qualité de la corne...		1	0						
TOTAL MODELE sur 100 points			0						
3 - ALLURES									
(Dans un but d'utilisation endurance)									
symétrie - rectitude		<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <th>NOTE de 0 à 20</th> <th>COEF</th> <th>TOTAL</th> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"> </td> <td style="text-align: center;">1</td> <td style="text-align: center;">0</td> </tr> </table>	NOTE de 0 à 20	COEF	TOTAL		1	0	
NOTE de 0 à 20	COEF	TOTAL							
	1	0							
aisance -amplitude - énergie		<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <th>NOTE de 0 à 20</th> <th>COEF</th> <th>TOTAL</th> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"> </td> <td style="text-align: center;">3</td> <td style="text-align: center;">0</td> </tr> </table>	NOTE de 0 à 20	COEF	TOTAL		3	0	
NOTE de 0 à 20	COEF	TOTAL							
	3	0							
TOTAL ALLURES sur 80 points :			0						

GRILLE ACA endurance modification 203

Cette évaluation de la qualité d'un cheval pour l'endurance reste très subjective et imprécise, malgré une conception des grilles de pointage pensée pour l'endurance, un effort d'harmonisation des notes et la formation de juges spécialisés.

Aucune étude ne qualifie de façon objective la locomotion optimale du cheval pour l'endurance. Dans d'autres races pratiquant d'autres disciplines comme le concours de saut d'obstacles (CSO), Dufosset et Langlois montrent, en 1984, par une ébauche d'analyse cinématique, que le jugement du saut en liberté lors des concours d'élevage n'est pas corrélé aux performances en compétition.

B. Evaluation objective de la locomotion chez le cheval

L'analyse biomécanique de la locomotion du cheval peut se faire par deux méthodes différentes mais néanmoins reliées : la méthode cinématique et la méthode cinétique.

La cinématique est définie comme l'étude de la description du mouvement, alors que la cinétique est l'étude de l'action de forces. Ainsi, la cinématique décrit le mouvement quand la cinétique l'explique. La cinématique évalue les caractéristiques spatiales et temporelles du mouvement, alors que la cinétique vise à définir et à mesurer les forces à l'origine d'un mouvement particulier.

Néanmoins, ces deux approches peuvent permettre une détection et une quantification objectives des boiteries chez le cheval.

1. Les méthodes cinétiques d'étude de la locomotion

a. Plateforme de forces et fer dynamométrique

L'initiative des méthodes cinétiques revient à Marey en 1873. A l'aide de capteurs de pression attachés aux fers sous les sabots et avec des accéléromètres pneumatiques attachés aux membres, il calculait la durée de contact entre le sabot et le fer aux différentes allures.

Aujourd'hui, les méthodes ont évolué mais les principes restent identiques (Barrey, 1999). Des capteurs de forces électroniques mesurent les forces externes, en enregistrant les forces de réaction du sol lorsque le sabot est en contact avec le sol. Ces capteurs sont

localisés sur le sol dans le cadre des plateformes de force, ou sont installés sous le sabot dans un fer dynamométrique.

Les plateformes de force renseignent sur l'amplitude et l'orientation de la force, les coordonnées de son point d'application et la valeur du moment en ce point (Barrey, 1999). Elles fournissent en particulier une valeur de la force verticale de réaction du sol (pVGRF), qui diminue significativement quand la sévérité de la boiterie augmente (Keegan, 2007). Avec une valeur basale de 9,79 N/kg (Ishihara *et al.*, 2005), ce paramètre présente la meilleure sensibilité et spécificité pour la détection d'une boiterie. Dans le cas d'une boiterie antérieure unilatérale, la valeur moyenne de pVGRF sur le membre antérieur boiteux diminue alors que le pVGRF moyen augmente pour l'antérieur controlatéral et les deux postérieurs au pas (Merkens et Schamhardt, 1988, b) et pour l'antérieur et le postérieur controlatéraux au trot (Weishaupt *et al.*, 2006). Concernant les boiteries postérieures unilatérales, la diminution du pVGRF moyen du postérieur boiteux s'accompagne d'une augmentation de ce paramètre pour les deux antérieurs au pas (Merkens et Schamhardt, 1988, b) et de faibles modifications du pVGRF pour les trois membres non boiteux au trot (Weishaupt *et al.*, 2004). Il demeure cependant une réserve concernant l'utilisation de ce paramètre puisque certaines boiteries ne causent pas de diminution ni d'augmentation de la valeur moyenne de pVGRF mais uniquement une modification de la forme du signal (Keegan, 2007). Toutefois, le plus gros désavantage de la plateforme de forces est la limitation de la surface sensible : l'enregistrement d'une série suffisante de foulées valides (au centre de la plateforme) et pures (sans poser concomitant d'un autre pied) concernant le membre étudié avec un cheval se déplaçant dans une fourchette limitée de vitesses est difficile et demande du temps.

L'installation d'une plateforme de force sous un tapis roulant (Weishaupt *et al.*, 1996, Weishaupt *et al.*, 2002) permet une mesure en continu et sur un nombre de foulées illimité des forces verticales des quatre membres (Clayton et Schamhardt, 2001), dans un contexte expérimental. Cet outil, réalisé sur mesure, est très onéreux et demande une expertise considérable pour son utilisation.

Les fers dynamométriques présentent l'avantage de permettre une analyse de la locomotion dans de nombreuses circonstances d'exercice, avec toutefois une moins bonne précision de mesure des forces de réaction du sol. Ils handicapent le cheval par leur poids et leur

épaisseur (Barrey, 1999). Des capteurs de contrainte fixés à la paroi du sabot peuvent également fournir une mesure indirecte des forces qui s'y exercent (Keegan, 2007).

b. Accélérométrie

L'accélérométrie, quant à elle, permet l'étude cinétique de la locomotion du cheval dans différentes conditions expérimentales et de terrain. Le capteur mesure l'accélération du corps donc les changements instantanés de la vitesse du corps pendant un intervalle de temps donné (Siegel, 2001). Cette technique est appliquée à la mesure des accélérations dorso-ventrales et transversales du sternum, calculant ainsi la symétrie et la régularité au pas et au trot (Barrey et Desbrosse, 1996) : le capteur est positionné au contact du sternum et maintenu par une sangle élastique. Les phénomènes locomoteurs sont enregistrés pendant tout le cycle de la foulée, aussi bien à l'appui qu'au soutien. La forme des signaux d'accélération est comparée entre les côtés droit et gauche et d'une foulée sur l'autre : une douleur, donc une boiterie, lors de la phase d'appui d'un membre réduit le coefficient de corrélation (similarité de forme) entre les signaux d'accélération des côtés droit et gauche, d'où une diminution de la symétrie, et entre deux foulées successives, d'où une diminution de la régularité (Keegan, 2007). Des accéléromètres attachés au membre ou au sabot permettent de mesurer le phénomène d'impact lors du contact avec le sol (Holden-Douilly *et al.*, 2013). A la différence des méthodes cinématiques, l'accéléromètre permet l'enregistrement de nombreuses foulées successives, et ne nécessite pas d'étalonnage. Ainsi, l'accélérométrie présente les avantages d'une simplicité et d'une rapidité d'utilisation sur le terrain, bien qu'il soit ensuite nécessaire de traiter les enregistrements grâce à un logiciel adéquat, comme Equimetrix®. Par ailleurs, le boîtier contenant le capteur et le logiciel d'exploitation restent à un prix abordable (quelques milliers d'euros). Pour tous ces avantages, l'accélérométrie est utilisée aussi bien en médecine humaine que vétérinaire afin de comparer le patron locomoteur d'un individu normal et d'un malade (Barthélémy *et al.*, 2009 ; Thomsen *et al.*, 2010), de tester les effets biomécaniques de différents sols (Chateau *et al.*, 2009 ; Chateau *et al.*, 2010), d'évaluer l'impact de procédures chirurgicales (Culp *et al.*, 2009), d'évaluer l'amélioration clinique après traitement d'une anomalie locomotrice ou après une anesthésie diagnostique (Bailly, 2009), de suivre les effets d'un sédatif (Lopez-Sanroman *et al.*, 2012) et de mesurer la variation de la locomotion avec l'activité physique (Watt *et al.*, 2010). L'accélérométrie apporte également une aide précieuse lorsque les conditions d'observation sont difficiles, comme lors d'un examen à grande vitesse.

Weishaupt *et al.* (2001) ont comparé l'examen locomoteur subjectif avec les méthodes cinétiques de plateforme de force et d'accélérométrie. Ils constatent une concordance du statut clinique du cheval (sain ou boiteux) entre l'examen subjectif et, respectivement, les deux méthodes cinétiques, ainsi qu'une corrélation du membre atteint entre l'examen subjectif et la plateforme de force. Enfin, ils ne montrent pas de corrélation pour la mesure de la sévérité de la boiterie entre les trois méthodes utilisées. Par ailleurs, ils mettent en évidence une relation plus significative entre la mesure de pVGRF pour les postérieurs et l'accélération dorso-ventrale au niveau du bassin (accéléromètre fixé au sommet de la croupe) qu'entre pVGRF pour les antérieurs et l'accélération dorso-ventrale au niveau du sternum (accéléromètre fixé au passage de sangle), ce qui s'explique par l'amortissement des mouvements du torse grâce au mouvement de la tête dans le cas d'une boiterie antérieure. Les méthodes cinétiques constituent donc un examen complémentaire utile à l'exploration des altérations subtiles de la locomotion, mais elles doivent toujours être mises en lien avec l'observation clinique du cheval. Bailly (2009) valide l'utilisation de capteurs accélérométriques, fixés sur le harnais et sur la croupe, pour quantifier les boiteries de chevaux trotteurs sur piste à grande vitesse. Les indices de symétrie et de latéralisation obtenus sont corrélés à la quasi-totalité des paramètres de l'évaluation clinique, avec toutefois une réserve pour l'identification des boiteries antérieures. Keegan *et al.* (2011) utilisent l'accélérométrie pour mesurer l'asymétrie des mouvements de la tête et de la croupe sur 236 chevaux boiteux trottant en ligne droite, et obtiennent une répétabilité suffisante pour permettre l'utilisation de cette méthode en clinique. En outre, selon McCracken *et al.* (2012), l'accélérométrie permet d'identifier une boiterie induite par une pression plus faible sur la sole que l'examen visuel réalisé par trois vétérinaires expérimentés : cette technique est donc plus sensible que l'évaluation subjective d'une boiterie discrète.

En conclusion, les systèmes d'évaluation de la locomotion par accélérométrie offrent une méthode relativement bon marché, portable, facile à utiliser et objective pour la détection et la quantification des boiteries chez le cheval.

2. Les méthodes cinématiques d'étude de la locomotion

Les méthodes cinématiques offrent une approche plus descriptive de la locomotion, avec l'utilisation d'une ou plusieurs caméras permettant l'analyse des caractéristiques du mouvement de chaque segment corporel. Le cheval est filmé par des caméras vidéos, avec des marqueurs collés à la surface de la peau, parallèlement à des repères anatomiques standards. Les systèmes les plus performants utilisent au moins quatre caméras pour reconstruire les mouvements en trois dimensions et analyser les mouvements des membres des deux côtés (Pourcelot *et al.*, 1997a). L'équipement d'analyse cinématique est très coûteux, les procédures d'étalonnage sont longues et complexes pour limiter les erreurs (facteur d'échelle, détection du mouvement) (Martino *et al.*, 2013). En outre, les systèmes de capture de mouvement en trois dimensions, avec toujours cette nécessité de réglage et d'étalonnage de nombreuses caméras, ne sont pas bien adaptés pour les mesures dans des conditions extérieures. Avec des caméras fixes, le champ de capture optique est restreint à environ 5 mètres et par conséquent, ne permet l'enregistrement que de quelques foulées. L'utilisation d'un tapis roulant permet de contourner cette limite (Keegan, 2007). Holden-Douilly *et al.* (2013) utilisent une alternative en analysant le mouvement en deux dimensions avec une caméra embarquée dans un véhicule qui suit le cheval au trot pour enregistrer plusieurs foulées successives.

Le patron locomoteur étant dépendant de la vitesse (Peham *et al.*, 1998), le tapis roulant est idéal pour travailler à une vitesse donnée et diminuer ainsi ce biais. De plus, certaines boiteries sont mieux visibles, avec une asymétrie cinématique plus marquée, à basse ou haute vitesse.

Les méthodes cinématiques fournissent tous les paramètres relatifs aux déplacements des différents segments (Siegel, 2001), autorisant une description précise et quantitative des signes cliniques. Ces méthodes permettent, entre autres, de calculer des indices de symétrie, par synchronisation des mouvements des membres droit et gauche puis par quantification de la symétrie locomotrice de chaque articulation. Une boiterie se manifeste par une augmentation de l'asymétrie de mouvement du corps et des membres, de l'asymétrie d'amplitude entre les côtés droit et gauche ou de l'asymétrie d'amplitude entre les mêmes phases du mouvement des deux côtés (Keegan, 2007).

Drevemo *et al.*, en 1987, mettent en évidence une asymétrie naturelle d'allure chez le cheval, asymétrie qui s'amplifierait avec l'entraînement. En cherchant à déterminer des indices standards de symétrie chez des chevaux non boiteux au petit trot, Pourcelot *et al.* (1997a) ont montré une grande variabilité intra-individuelle de ces indices de symétrie ; toutefois les valeurs moyennes restent proches entre les différents chevaux. Il est donc nécessaire de déterminer, pour chaque paramètre cinématique utilisé, un seuil d'asymétrie. Les paramètres faisant état d'une asymétrie naturelle élevée ou reportant une grande variabilité d'une foulée sur l'autre seront potentiellement moins sensibles comme indicateurs de boiterie (Keegan, 2007).

Cette méthode a pourtant l'intérêt d'être suffisamment sensible pour différencier des degrés de boiterie assez peu distincts, même si elle ne permet pas la détermination du côté boiteux et n'est pas capable de détecter les boiteries bilatérales symétriques (Pourcelot *et al.*, 1997b). Keegan *et al.* (2004) considèrent toutefois que sa sensibilité est moins bonne qu'une analyse accélérométrique avec un accéléromètre à la tête, un autre au sommet de la croupe et des gyroscopes fixés sur les membres antérieur et postérieur du même côté, mais sur une étude qui n'inclut que huit chevaux.

Enfin, d'autres paramètres cinématiques aideraient à la localisation de la boiterie sur le membre affecté (Keegan, 2007).

L'analyse cinématique de la locomotion est donc une méthode attractive pour l'évaluation objective des boiteries, même si elle reste coûteuse, chronophage et d'une grande technicité.

Dans le cadre du projet GenEndurance, l'évaluation de la locomotion des chevaux d'endurance est réalisée à l'aide d'un accéléromètre placé contre le sternum, permettant une quantification objective du patron locomoteur, avec un coût et un temps de traitement des données raisonnable.

DEUXIÈME PARTIE : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

L'étude expérimentale suivante s'inscrit dans le cadre du projet GenEndurance. Ce projet, né de la collaboration de l'équipe de Biologie Intégrative et Génomique Equine du laboratoire GABI de l'INRA de Jouy-en-Josas, de l'Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort (ENVA) et de l'Unité de Biologie Intégrative des Adaptations à l'Exercice de l'INSERM, est codirigé par le Docteur Céline Robert (ENVA) et le Docteur Eric Barrey (INRA, INSERM). Il est mené sur quatre années, de 2011 à 2014, et est financé par l'IFCE, l'ACA et le Fonds « d'Encouragement aux Projets Equestres Régionaux Ou Nationaux » (EPERON).

Ce projet a pour objectif d'identifier les biomarqueurs et les déterminants génétiques permettant de caractériser les aptitudes sportives en course d'endurance. En caractérisant les profils phénotypiques et génétiques des chevaux les plus performants, il devrait permettre d'améliorer les critères de sélection des jeunes chevaux lors des épreuves d'élevage, en particulier l'évaluation de leur locomotion, et éventuellement de développer, à terme, un test génétique d'évaluation de l'aptitude génétique d'un jeune cheval pour l'endurance. Les sujets étudiés sont des chevaux avec au moins un ascendant de race Arabe et des performances en endurance en France sur des courses d'au moins 90 kilomètres. Avant certaines compétitions, l'équipe du projet GenEndurance réalise, sur les chevaux volontaires, un génotypage, grâce à une prise de sang, et un phénotypage, avec un test d'allures, des mesures morphométriques et une photographie de profil.

L'étude expérimentale présentée dans cette thèse porte uniquement sur l'analyse des allures du projet GenEndurance. Elle cherche à caractériser la locomotion du cheval d'endurance avant la course et à relier d'une part les paramètres obtenus par accélérométrie et d'autre part les performances du cheval lors de cette compétition et durant sa carrière sportive en France de 2002 à 2012. Elle permettrait ainsi de proposer finalement des critères objectifs et pertinents de jugement des allures des jeunes chevaux destinés à l'endurance.

I. Matériels et méthodes

A. Effectif étudié et mode de recrutement

Dans cette étude, les chevaux sont recrutés, sur la base du volontariat, lors de compétitions d'endurance de niveau national de 90 à 160 km courues en France entre avril et septembre 2011. Ils doivent également avoir au moins un ascendant arabe et être âgés de 7 ans au minimum. Au total, 251 chevaux ont été pris en compte dans cette étude. Le taux de participation avoisinait 25% des chevaux éligibles. Les mesures ont été réalisées la veille de la course sur 7 compétitions (Tableau 4).

Tableau 4 : Epreuves sur lesquelles sont recrutés les chevaux de l'étude

Lieux	Dates	Niveau de l'épreuve	Nombre de chevaux enregistrés
Fontainebleau	01/04/11	90, 130 km	23
Sommant	6 et 7/05/11	90, 100, 130, 160 km	35
Castelsagrat	19 au 21/05/11	90, 100, 130, 160 km	37
Compiègne	27 et 28/05/11	100, 120, 130 km	47
Corlay	10 et 11/06/11	100, 130, 160 km	38
Compiègne	18 et 19/08/11	120, 125, 130, 160 km	22
Monpazier	1 et 2/09/11	90, 130, 140, 160 km	45

Par ailleurs, quatre chevaux ont été enregistrés à l'entraînement et ont couru quelques semaines plus tard, sur 160 km (Florac) pour l'un et 125 km (Compiègne) pour les autres. Dans leur cas, les performances au cours de ces compétitions ont été prises en compte.

B. Protocole

1. Acquisition des données

a. Informations concernant les chevaux étudiés

La liste des chevaux éligibles pour l'étude est établie avant la compétition à partir de la liste des chevaux engagés. L'identité des chevaux est vérifiée par lecture de leur transpondeur électronique au moment où ils sont présentés. La base d'étude comporte les données fournies par le SIRE : numéro SIRE, nom, âge, sexe, race et origines des chevaux. Le site FFEcompét nous renseigne sur les résultats des épreuves, tandis que les indices de carrière sportive, calculés selon la méthode officielle développée par l'INRA, sont fournis par l'IFCE.

b. Test d'allure

Les chevaux sont examinés la veille de la course à l'aide du dispositif accélérométrique en trois dimensions Equimétrie®. Le capteur est appliqué dans le plan médian contre le sternum au moyen d'une sangle élastique attachée au cheval et avec une poche aménagée pour contenir le boîtier (Figure 3). Cette position anatomique (Figure 4) lui offre une bonne stabilité et les axes de mesures sont approximativement horizontal et vertical sur le cheval debout.

Figure 3 : Fixation de l'accéléromètre à la sangle Figure 4 : Mise en place du dispositif sur le cheval
(<http://genendurance.over-blog.com>)



Le test d'allure consiste en un aller au pas et un retour au trot, en main sur une piste de 40 à 50 mètres en ligne droite. Le cavalier doit veiller à garder son cheval à vitesse constante, dans une attitude rectiligne.

A cause de la diversité des sites de compétition, la longueur et la surface de la piste utilisée pour le test d'allure varient d'une course sur l'autre. Le Tableau 5 fournit les caractéristiques des pistes.

Tableau 5 : Caractéristiques de la piste dédiée au test d'allure suivant le site

Enregistrement	Longueur de la piste (m)	Nature du sol
Fontainebleau	60	Sable
Sommant	40	Sable
Castelsagrat	40	Sable
Compiègne 05/11	50	Stabilisé
Corlay	75	Herbe
Compiègne 18 et 20/08/11	50	Stabilisé
Monpazier	50	Herbe
Nord	75	Herbe

c. Transfert des données

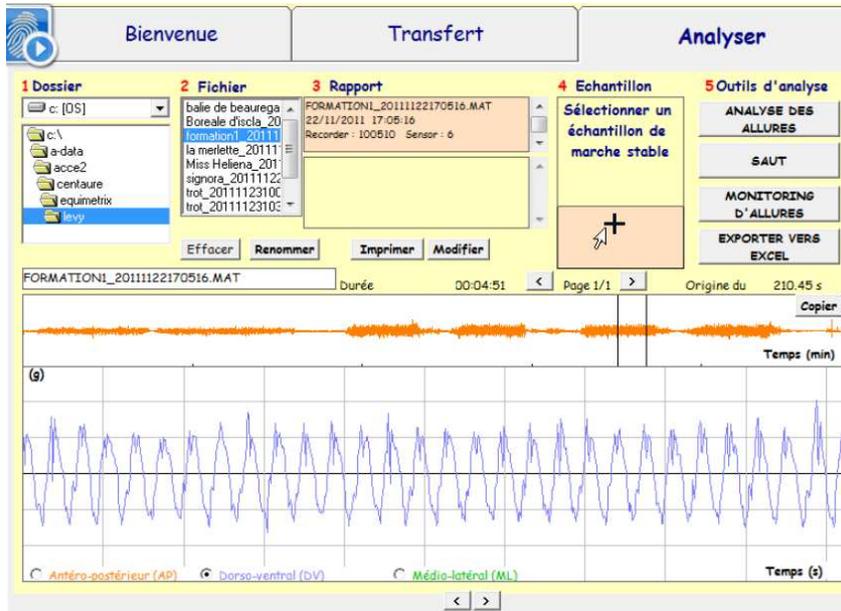
Après chaque test d'allure, le boîtier est connecté à un ordinateur portable par un câble USB. L'enregistrement est ensuite transféré, renommé et stocké avec l'aide du logiciel Equimetrix®.

2. Traitement des données

a. Traitement des enregistrements par Equimetrix®

Le logiciel Equimetrix® affiche dans un premier temps l'enregistrement complet du test d'allure, depuis la mise en marche de l'accéléromètre jusqu'à son arrêt (Figure 5).

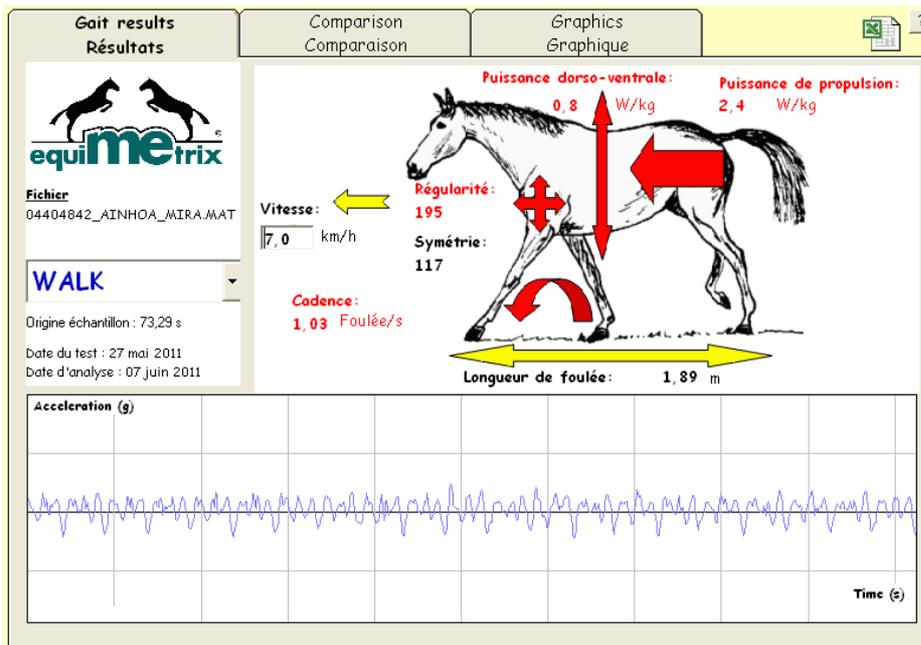
Figure 5 : Enregistrement fourni par l'enregistreur (Equimetrix®). La courbe orange correspond à l'ensemble du tracé.



Pour chaque cheval, l'opérateur sélectionne une séquence de 10,24 secondes au pas et au trot, parmi les foulées les plus régulières. Seule cette partie de l'enregistrement sera analysée par le logiciel.

Le logiciel fournit alors différents paramètres (Figure 6) qui peuvent être comparés à des valeurs moyennes affinées au fur à mesure des enregistrements.

Figure 6 : Paramètres fournis par Equimetrix® pour un cheval au pas



i. Paramètres de coordination

La symétrie de la locomotion au pas et au trot peut être quantifiée en appliquant la fonction d'auto-corrélation au signal accélérométrique. Cette procédure mathématique indique les similitudes ou dissimilitudes de la courbe par rapport à elle-même, au cours du temps, en calculant la corrélation de séries de mesures sur des intervalles de temps déterminés. Au trot normal, une foulée complète comprend deux mouvements dorso-ventraux similaires : un pic de corrélation doit donc être présent à chaque intervalle de temps correspondant à chaque demi-foulée. La fonction d'auto-corrélation donne les pics périodiques de corrélation correspondant aux demi-foulées. La valeur maximale du pic de corrélation est égale à 1 et indique que la série de mesures est exactement similaire à elle-même. Les deux premiers pics des courbes d'auto-corrélation fournissent deux coefficients de corrélation qui quantifient respectivement la symétrie de la locomotion, c'est-à-dire la similitude entre les mouvements droit et gauche, et la régularité de la locomotion, c'est-à-dire la similitude entre la foulée n et la foulée $n+1$. Les indices de symétrie et de régularité subissent ensuite une transformation logarithmique afin de suivre une distribution normale et peuvent être rangés sur une échelle linéaire de 0 à 450.

ii. Paramètres cinématiques

- La vitesse

- La cadence ou fréquence de la foulée

Toutes les allures, à vitesse constante, peuvent être considérées comme la somme de mouvements périodiques stationnaires. Ainsi, l'analyse de Fourier peut être appliquée aux signaux accélérométriques. Les principales harmoniques du mouvement peuvent être extraites à partir du spectre de la transformée rapide de Fourier (Fast Fourier Transform = FFT) qui exprime le carré de l'amplitude de l'accélération (en $(m.s^{-2})^2$) en fonction de la fréquence (en Hz). Cette procédure a donc été appliquée à l'accélération dorso-ventrale enregistrée au pas et au trot. Dans ce cas, la première harmonique correspond au mouvement périodique d'une demi-foulée. La fréquence de la foulée est déduite en divisant la fréquence de la première harmonique par deux (Barrey *et al.*, 1994).

- La longueur de la foulée

Elle correspond à la longueur moyenne qui sépare deux posers du même pied, exprimée en mètres. Elle est déduite de la relation : $Vitesse (m/s) = fréquence (Hz) \times longueur \text{ du pas (m)}$. Elle est proportionnelle à la vitesse et dépend de la taille du cheval.

iii. Paramètres énergétiques

Ces variables caractérisent les différentes composantes de l'accélération et sa force.

L'amplitude des déplacements suivant les trois axes est calculée par une double intégration de l'accélération.

La puissance, quant à elle, est calculée par intégration du spectre de puissance du signal d'accélération selon les trois axes.

- La puissance dorso-ventrale

Elle quantifie les efforts de poussée et de charge dorso-ventraux.

- La puissance de propulsion sur l'axe antéro-postérieur

Cette variable quantifie la puissance mécanique moyenne développée par le cheval pour se porter en avant ou pour freiner. Cette mesure est liée à la fois à l'amplitude et à la vitesse des mouvements de propulsion.

- La puissance médio-latérale
- La puissance totale, qui est la somme des puissances selon les trois axes.

b. Traitement statistique des données

Le logiciel Equimetrix® permet, pour chaque cheval, l'exportation des paramètres calculés pour le pas et le trot, vers un tableur Excel®.

Ces données sont ensuite analysées par le logiciel de statistique NCSS 2007® et présentés avec un seuil de signification de 0,05.

La relation entre la locomotion avant la compétition et les performances sur cette même course est tout d'abord étudiée. L'association statistique entre les paramètres locomoteurs

et le résultat de la course est testée par une analyse de variance GLM (General Linear Model) à plusieurs facteurs (résultat de la course, site de compétition et caractéristiques physiques de la piste d'enregistrement). Un test de comparaison des moyennes LSD (Least Significant Difference) de Fisher est ensuite utilisé pour comparer les moyennes des paramètres montrant un effet significatif. Enfin, la corrélation entre le rang de classement des chevaux et leur locomotion est calculée par un test de corrélation de Spearman.

Dans un deuxième temps est étudiée, à l'aide d'un test de corrélation de Pearson, la relation entre la locomotion et la carrière sportive, cette dernière étant quantifiée par les trois indices endurance élémentaires (vitesse, classement et distance) et par l'indice de performance global.

II. Résultats

A. Etude descriptive de l'échantillon

1. Caractéristiques des chevaux de l'étude

Notre étude a porté sur 251 chevaux.

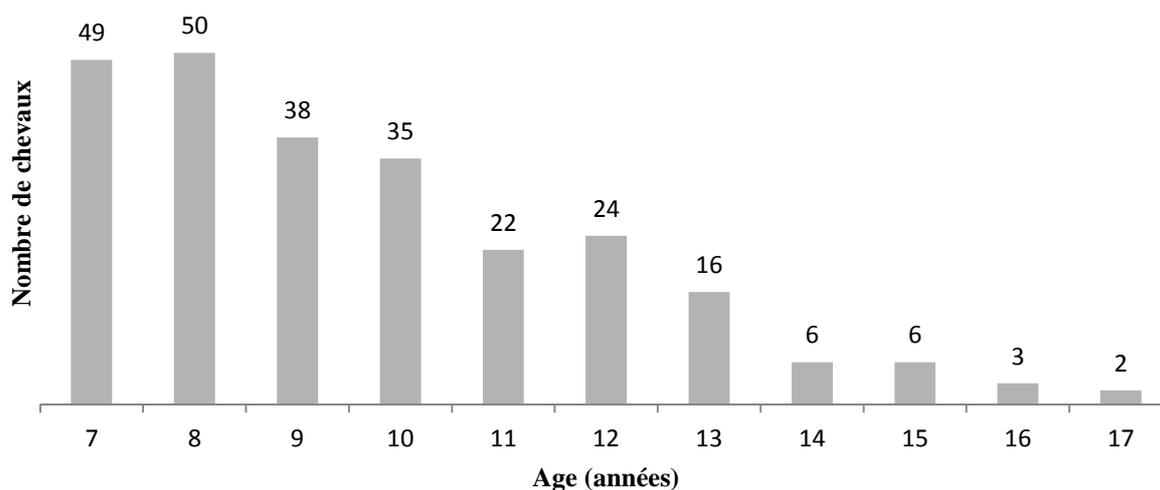
a. Race

Seuls les chevaux avec au moins un ascendant arabe ont été inclus dans l'étude. La population se distribue en 162 chevaux pur-sang arabe (64,5%) et en 89 chevaux demi-sang arabe (35,5%).

b. Age

Les chevaux de l'étude sont âgés de 7 à 17 ans, avec une moyenne de 9,7 ans, un écart-type de 2,3 ans et une médiane de 9 ans. Leur répartition selon leur âge est illustrée par la Figure 7.

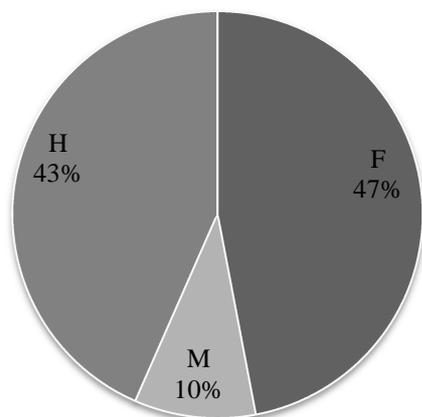
Figure 7 : Répartition des chevaux selon l'âge



c. Sexe

La population étudiée comprend 118 juments (F), 24 mâles entiers (M) et 109 hongres (H). La Figure 8 montre la répartition des sexes : les mâles représentent 10% de l'échantillon, contre 47% de juments et 43% de hongres.

Figure 8 : Répartition des chevaux selon le sexe (H : hongre, M : mâle, F : femelle)



2. Etude descriptive des performances des chevaux de l'étude

a. Performance sur la course

A l'issue de la compétition qui suit l'enregistrement, les résultats des participants ont été collectés à partir des classements officiels transmis à la FFE ou à la FEI. Les chevaux ont été répartis en quatre groupes : (i) classement, (ii) élimination pour boiterie ou (iii) pour raison métabolique, et (iv) abandon. Pour trois de ces chevaux, la cause d'élimination n'est pas mentionnée sur le site FFEcompét.

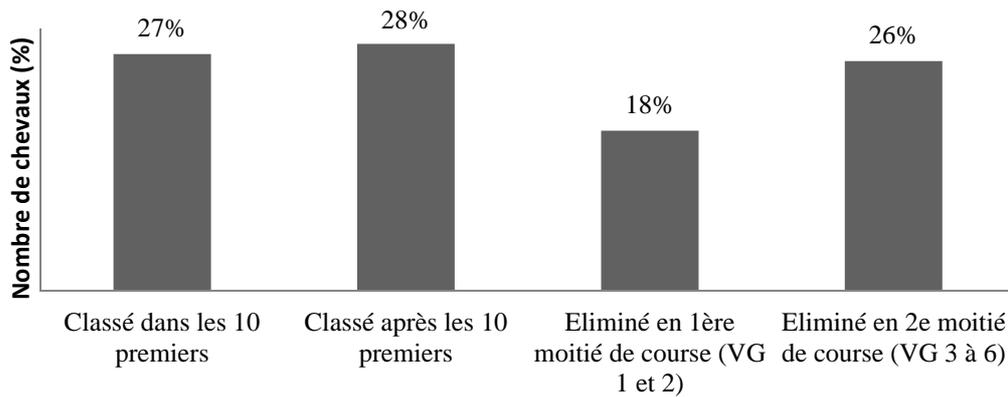
Sur le total de 251 chevaux examinés, 55,4% ont été classés à la fin de la course, 28,3% ont été éliminés pour boiterie, 6,4% pour raison métabolique, 8,8% des cavaliers ont abandonné, et 1,2% sont éliminés pour une raison inconnue (Tableau 6).

Tableau 6 : Distribution des chevaux selon la longueur de la course et leur classement

Distance (km)	Chevaux	Classés		Éliminé boiterie		Éliminé métabolique		Abandon		Éliminé Cause inconnue	
		Nb	%	Nb	%	Nb	%	Nb	%	Nb	%
90	30	17	56,7%	10	33,3%	2	6,7%	1	3,3%	0	0,0%
100	24	17	70,8%	6	25,0%	0	0,0%	1	4,2%	0	0,0%
120	21	15	71,4%	6	28,6%	0	0,0%	0	0,0%	0	0,0%
125	9	4	44,4%	0	0,0%	1	11,1%	4	44,4%	0	0,0%
130	109	56	51,4%	30	27,5%	9	8,3%	11	10,1%	3	2,8%
140	9	7	77,8%	0	0,0%	1	11,1%	1	11,1%	0	0,0%
160	49	23	46,9%	19	38,8%	3	6,1%	4	8,2%	0	0,0%
Total	251	139	55,4%	71	28,3%	16	6,4%	22	8,8%	3	1,2%

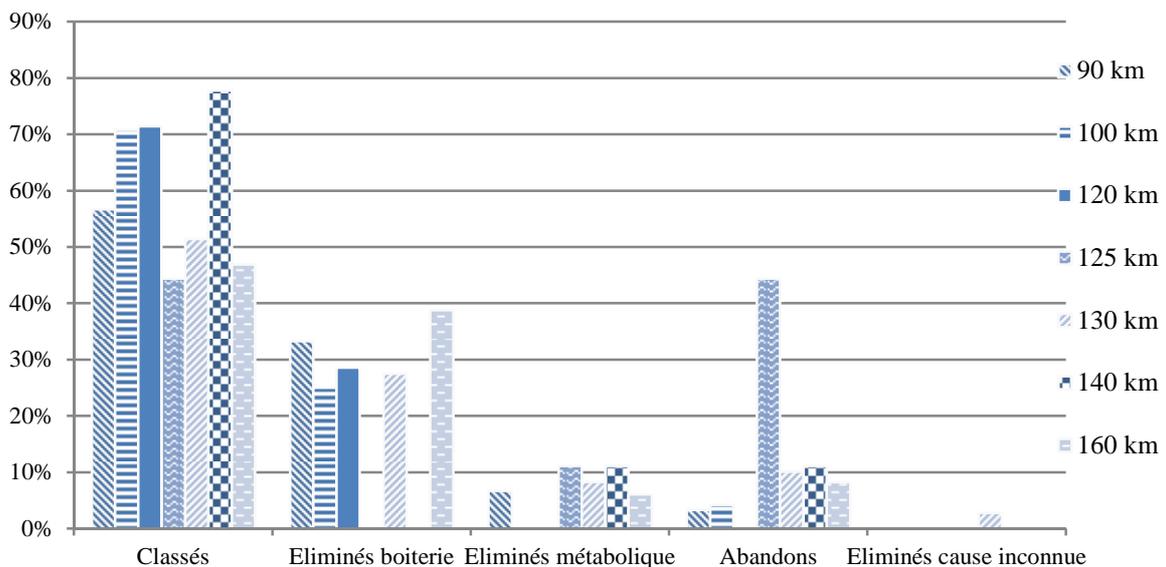
L'échantillon étudié comporte 27% de chevaux classés dans les dix premiers, 28% arrivés plus loin dans le classement, 26% de chevaux éliminés dans la 2^e moitié de la course (du 3^e au 6^e vet-gate) et 18% de chevaux éliminés dans la première moitié de course (Figure 9). Ainsi, les différentes catégories de performance sont bien représentées dans cette étude, même si les chevaux éliminés en début de course sont moins nombreux.

Figure 9 : Catégories de performance sur la course étudiée, au sein de l'échantillon



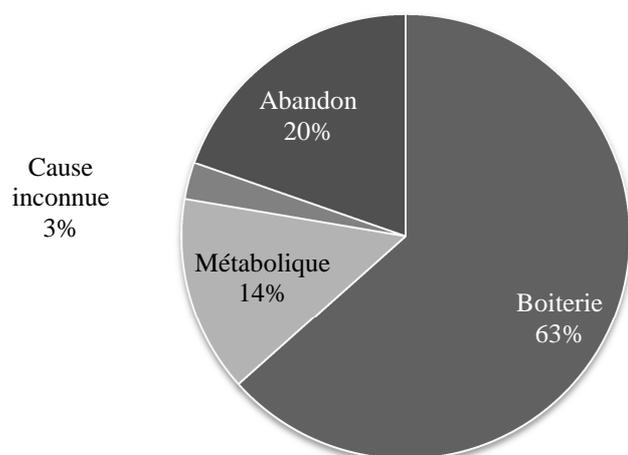
Selon la difficulté de la course, le taux de classement et le taux d'élimination varient légèrement, et la distance de la compétition ne semble pas être un facteur de risque d'élimination pour quelque raison que ce soit (Figure 10).

Figure 10 : Classement et éliminations selon la longueur de la course



Les boiteries concernent 78,9% des 90 chevaux éliminés et représentent donc la première cause de non-classement (soit 63%) (Figure 11).

Figure 11 : Répartition des causes de non-classement



b. Carrière sportive

Seuls les chevaux âgés d'au moins 7 ans ont été inclus dans l'étude. Chacun d'entre eux est caractérisé par des indices de performance sur les compétitions d'au moins 90 km courues en France entre les années 2002 et 2012. Seuls quatre chevaux de l'effectif ne disposent pas d'indices de performance.

L'INRA, avec des corrections intégrant l'effet de l'âge et du sexe, calcule dans un premier temps les indices élémentaires de vitesse, de classement et de distance.

L'indice de performance global, ou indice de carrière (IRE pour Indice de performance en Raid d'Endurance) est ensuite calculé à partir de ces indices élémentaires, en tenant compte des corrélations existant entre eux, et en appliquant pour chacun une pondération de 35% pour la vitesse et la distance, et de 30% pour le classement.

Chaque indice est accompagné d'un coefficient de détermination (CD), compris entre 0 et 1, qui informe sur la précision de la valeur de l'indice : cette précision augmente lorsque le CD s'approche de 1.

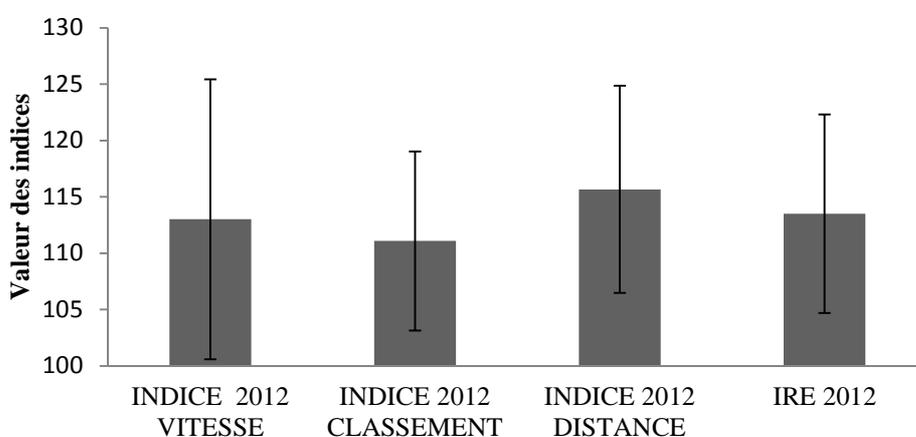
En matière de performance, le cheval moyen de l'étude est supérieur au « cheval moyen d'endurance » (indice 100), avec des indices moyens supérieurs à 110 (Tableau 7).

Néanmoins, la population étudiée présente une grande dispersion autour de la moyenne des différents indices, avec des écarts-types élevés (Figure 12).

Tableau 7 : Description des indices de performance des chevaux de l'étude (n=251)

	Indice vitesse	Indice classement	Indice distance	Indice de carrière (IRE)
Moyenne	113,0	111,1	115,7	113,5
Ecart-type	24,8	15,9	18,4	17,6
Médiane	115	110	114	112
Minimum	47	77	76	70
Maximum	177	157	168	165

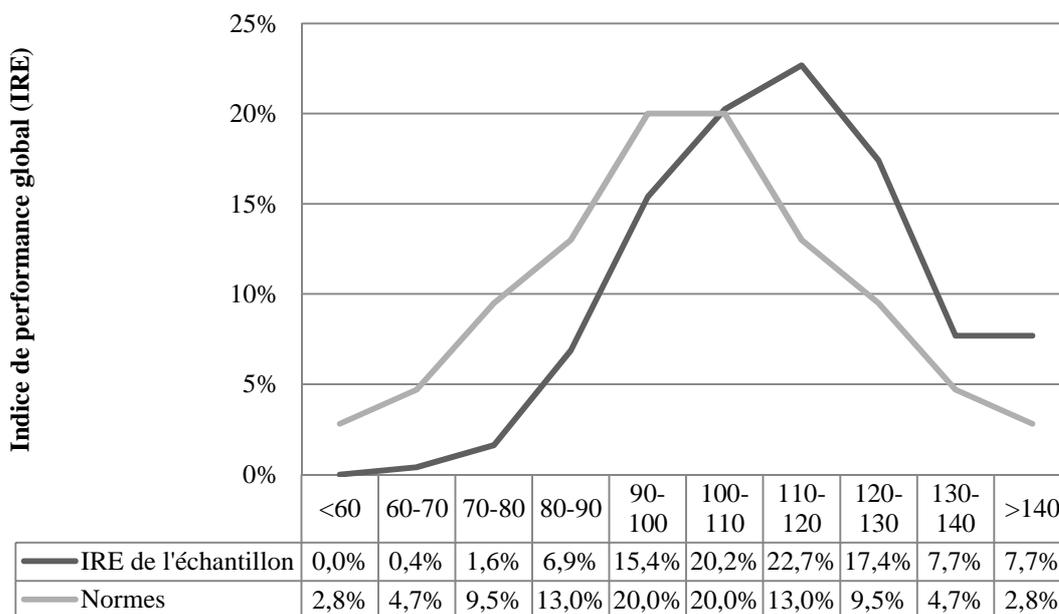
Figure 12 : Indices moyens de performance des chevaux de l'étude. La barre d'erreur indique l'écart-type.



Concernant la précision des indices, sur les 247 chevaux indicés, seul un cheval présente un CD inférieur à 0,3 (0,21) pour l'indice de vitesse : cette valeur n'est donc pas fiable. Pour les autres indices, les CD sont toujours supérieurs à 0,3.

Les indices sont conçus de façon à ce qu'un cheval moyen possède un indice de 100, et qu'approximativement 50% des chevaux aient un indice supérieur à 100, 30% supérieur à 110, 17% supérieur à 120, 7,5% supérieur à 130 et 2,8% supérieur à 140. Ainsi, dans notre étude, l'échantillon étudié ne présente pas une distribution des indices telle qu'elle est conçue par l'INRA pour la population totale. Par comparaison avec la population totale (Figure 13), le pic de distribution des indices « de carrière » dans l'échantillon se situe autour de 110, avec moins de chevaux indicés en dessous de 100 et plus de chevaux avec un indice élevé.

Figure 13 : Comparaison de la distribution de l'indice de carrière (IRE) des chevaux de l'étude et de la population des chevaux d'endurance



Dans notre échantillon, les indices de performance des chevaux varient selon le concours sur lequel ils ont été recrutés. En effet, les niveaux sportifs entre les sites de compétition ne sont pas homogènes. Le test statistique GLM met en évidence, avec p inférieur à 0,001, un effet du lieu de compétition sur tous les indices de performance des chevaux.

B. Caractérisation des allures des chevaux d'endurance

Les 251 chevaux de l'étude ont été soumis au test d'allure. Les paramètres locomoteurs ont été calculés sur 247 chevaux au pas et 233 chevaux au trot, du fait de certaines séquences d'enregistrement non interprétables (4 séquences non interprétables au pas, soit 1,6%, et 18 au trot, soit 7,2%).

Les valeurs moyennes du test d'allure au pas et au trot chez les chevaux d'endurance dans des conditions de terrain sont présentées dans le Tableau 8 et le Tableau 9, accompagnées de leur écart-type. Au vu des écarts-type importants, les chevaux présentent une grande dispersion autour de ces valeurs moyennes, en particulier pour les indices de symétrie et de régularité.

Tableau 8 : Paramètres de la locomotion au pas : moyennes, écarts-types, médianes, maxima et minima

	Fréquence de foulée (Hz)	Indice de régularité	Indice de symétrie	Déplacement dorsoventral (cm)	Puissance dorsoventrale (W/kg)	Puissance de propulsion (W/kg)	Puissance médiolatérale (W/kg)	Puissance totale (W/kg)
Moyenne	0,92	221,95	203,05	3,62	1,12	1,53	1,73	4,40
Ecart-type	0,07	38,34	58,34	1,18	0,48	0,66	0,79	1,50
Médiane	0,93	226,00	193,00	3,00	1,10	1,40	2,00	4,30
Minimum	0,73	87,00	97,00	1,00	0,20	0,40	0,00	1,00
Maximum	1,07	306,00	446,00	8,00	3,20	4,80	6,00	11,10

Tableau 9 : Paramètres de la locomotion au trot : moyennes, écarts-types, médianes, maxima et minima

	Fréquence de foulée (Hz)	Indice de régularité	Indice de symétrie	Déplacement dorsoventral (cm)	Puissance dorsoventrale (W/kg)	Puissance de propulsion (W/kg)	Puissance médiolatérale (W/kg)	Puissance totale (W/kg)
Moyenne	1,50	322,36	254,58	8,91	18,10	10,60	5,48	34,18
Ecart-type	0,09	44,92	52,95	1,64	4,38	5,27	2,70	8,93
Médiane	1,51	326	243	9	17,90	9,20	5,00	32,90
Minimum	1,27	208	157	5	6,60	2,90	1,00	16,70
Maximum	1,76	426	485	14	36,80	32,00	21,00	70,70

Au sein de ce même projet de recherche, la morphologie des chevaux a été étudiée par Tribout (2013). En matière de hauteur au garrot, de périmètre thoracique, de longueur corporelle, de pli cutané, de poids et de note d'état corporel, le test de corrélation de Pearson révèle une corrélation significative entre certains paramètres locomoteurs et la morphologie des chevaux (Tableau 10). Au pas, la fréquence de foulée est significativement corrélée positivement ($p < 0,01$) à l'épaisseur du pli cutané mesurée en arrière de l'épaule et négativement au poids, tandis que la puissance médiolatérale est significativement corrélée positivement ($p < 0,05$) à la note d'état corporel. Au trot, seule la régularité est significativement corrélée négativement ($p < 0,05$) à la longueur corporelle. Aucune autre corrélation significative (avec un seuil de 0,05) n'a été mise en évidence entre les paramètres locomoteurs enregistrés et la morphologie des chevaux.

Tableau 10 : Paramètres locomoteurs et morphologiques significativement corrélés

Paramètre locomoteur	Paramètre morphologique	R	p
Fréquence de foulée au pas	Pli cutané	0,39	<0,01
	Poids	-0,37	<0,01
Puissance médiolatérale au pas	Note d'état corporel	0,27	<0,05
Régularité au trot	Longueur corporelle	-0,31	<0,05

1. Relation entre les allures et les performances sur la course

Nous avons étudié la relation statistique entre la locomotion du cheval, à travers les paramètres enregistrés par accélérométrie, et ses performances au cours de l'épreuve qui a suivi son enregistrement.

a. Locomotion et lieu de compétition

Le test statistique GLM permet d'analyser l'effet du lieu de compétition sur la locomotion, même avec des effectifs déséquilibrés.

Au pas, un effet significatif du lieu de concours sur la fréquence de foulée, la régularité et la puissance dorsoventrale a été mis en évidence (Tableau 11).

Tableau 11 : Effet du lieu de compétition sur les paramètres locomoteurs au pas

Variables au pas	F	p
Fréquence de foulée	9,33	<0,001
Régularité	5,18	<0,001
Symétrie	NS	NS
Déplacement dorsoventral	NS	NS
Puissance dorsoventrale	2,23	<0,05
Puissance de propulsion	NS	NS
Puissance médiolatérale	NS	NS
Puissance totale	NS	NS

Le site de compétition a un effet significatif sur tous les paramètres locomoteurs au trot sauf sur la puissance totale (Tableau 12).

Tableau 12 : Effet du lieu de compétition sur les paramètres locomoteurs au trot

Variables au trot	F	p
Fréquence de foulée	4,53	<0,001
Régularité	6,38	<0,001

Symétrie	2,26	<0,05
Déplacement dorsoventral	3,95	<0,001
Puissance dorsoventrale	3,68	<0,001
Puissance de propulsion	4,24	<0,001
Puissance médiolatérale	2,28	<0,05
Puissance totale	NS	NS

Le lieu de concours pourrait avoir un effet très significatif sur certains paramètres locomoteurs au pas et au trot par le biais de la piste sur laquelle est réalisé le test d'allure et des chevaux recrutés.

b. Effet physique de la piste d'enregistrement

Pour chaque site de compétition, les caractéristiques physiques de la piste utilisée pour l'enregistrement des allures, en matière de sol (sable, stabilisé, herbe) et de longueur de piste (de 40 à 75 mètres), ont été définies.

De la même façon que précédemment, le modèle statistique GLM a été utilisé pour étudier les effets individuels du sol et de la longueur de piste sur les paramètres locomoteurs, et ainsi expliquer la variabilité de la locomotion par des paramètres caractérisant physiquement la piste.

Au pas (Tableau 13), la longueur de la piste et la nature de son sol ont tous les deux un effet significatif sur la fréquence de foulée et la régularité. Seule la longueur de piste présente un effet significatif sur la puissance dorsoventrale. Quant aux autres paramètres locomoteurs, aucun effet significatif de la piste n'est mis en évidence.

Tableau 13 : Effets de la longueur et du sol de la piste d'enregistrement sur les paramètres locomoteurs au pas

Variables au pas	Effet de la longueur de piste		Effet du sol de la piste	
	F	p	F	p
Fréquence de foulée	15,25	<0,001	16,44	<0,001
Régularité	7,26	<0,001	4,47	<0,05
Symétrie	NS	NS	NS	NS
Déplacement dorsoventral	NS	NS	NS	NS
Puissance dorsoventrale	3,70	<0,05	NS	NS
Puissance de propulsion	NS	NS	NS	NS
Puissance médiolatérale	NS	NS	NS	NS
Puissance totale	NS	NS	NS	NS

Au trot (Tableau 14) la longueur et la nature du sol de la piste d'enregistrement ont un effet significatif sur la fréquence de foulée, la régularité, le déplacement dorsoventral et la puissance médiolatérale. Seule la longueur de piste a un effet significatif sur la puissance de propulsion et la puissance totale.

Tableau 14 : Effets de la longueur et du sol de la piste d'enregistrement sur les paramètres locomoteurs au trot

Variables au trot	Effet de la longueur de piste		Effet du sol de la piste	
	F	p	F	p
Fréquence de foulée	7,88	<0,001	7,63	<0,001
Régularité	10,13	<0,001	4,81	<0,01
Symétrie	NS	NS	NS	NS
Déplacement dorsoventral	5,91	<0,001	8,87	<0,001
Puissance dorsoventrale	NS	NS	NS	NS
Puissance de propulsion	7,37	<0,001	NS	NS
Puissance médiolatérale	4,34	<0,01	5,46	<0,01
Puissance totale	2,83	<0,05	NS	NS

Il existe donc un effet de la nature du sol et de la longueur de la piste utilisée pour le test d'allure sur différents paramètres locomoteurs au pas et au trot. L'effet du site de compétition sur la locomotion des chevaux semble donc être en partie confondu avec l'effet physique de la piste d'enregistrement.

c. Locomotion et issue de la course

La relation entre le résultat de la compétition et la locomotion des chevaux avant la course a été étudiée. Dans le modèle GLM, le résultat de la course (cheval classé, éliminé pour boiterie, pour cause métabolique, pour raison inconnue ou abandon) a été intégré en plus des variables étudiées précédemment. Les deux modèles, prenant en compte dans un cas le lieu de compétition, dans l'autre les caractéristiques de la piste d'enregistrement, peuvent se justifier et ont été analysés conjointement.

Après correction de l'effet du lieu de compétition, le test met uniquement en évidence une relation significative entre l'issue de la course et la régularité au pas (F=3.08 avec $p < 0,05$).

Avec le deuxième modèle, après correction des effets physiques de la piste d'enregistrement des allures, on constate à nouveau cette relation entre le résultat de la

course et la régularité au pas, mais cette fois encore plus significative ($F=3.49$ avec $p<0,01$).

La relation entre l'issue de la course et la régularité au pas étant significative, il est permis d'utiliser un test de comparaison des moyennes LSD de Fisher.

Appliqué au modèle prenant en compte les caractéristiques de la piste d'enregistrement (Tableau 15), pour lequel la relation étudiée était la plus significative, le test révèle deux groupes de moyennes de régularité au pas significativement différents ($p<0,05$) selon le résultat de la course : les chevaux ayant abandonné la compétition, avec l'indice de régularité le plus bas, et le groupe réunissant les chevaux classés et éliminés.

Tableau 15 : Groupes de moyennes selon la régularité au pas (après correction par les effets physiques de la piste d'enregistrement) ($p<0,05$)

	Abandon	Classement	Elimination pour boiterie	Elimination pour cause métabolique	Elimination pour cause inconnue
Régularité moyenne au pas (écart-type)	187,42 (8,70)	229,97 (3,42)	231,46 (4,73)	240,25 (9,97)	205,34 (23,02)
Nombre de chevaux	21	136	71	16	3
Groupe de moyennes	a	b	b	b	

Selon le modèle de correction de l'effet du lieu de compétition (Tableau 16), le test met en évidence trois groupes significativement différents ($p<0,05$) de moyennes de régularité au pas : le groupe des abandons, toujours avec la régularité au pas la plus basse, le groupe des chevaux classés et éliminés pour boiterie, de régularité intermédiaire, et le groupe des chevaux éliminés pour raison métabolique, avec l'indice de régularité le plus élevé.

Tableau 16 : Groupes de moyennes selon la régularité au pas (après correction par le lieu de compétition) ($p<0,05$)

	Abandon	Classement	Elimination pour boiterie	Elimination pour cause métabolique	Elimination pour cause inconnue
Régularité moyenne au pas (écart-type)	190,29 (8,00)	222,22 (3,14)	219,97 (4,35)	245,32 (9,17)	242,00 (21,17)
Nombre de chevaux	21	136	71	16	3
Groupe de moyennes	a	b	b	c	

d. Locomotion et rang de classement

La relation entre les paramètres locomoteurs des 139 chevaux classés et leur rang de classement a été étudiée à l'aide d'un test de corrélation de Spearman, avec un seuil de signification de 0,05.

Le rang de classement est significativement corrélé négativement à la puissance médiolatérale au pas ($r=-0,19$, $p<0,05$). Aucune autre corrélation significative n'a été identifiée.

2. Relation entre les allures et la carrière sportive

Afin d'étudier la relation entre la locomotion et la carrière sportive des chevaux (Tableau 17), un test de corrélation de Pearson est appliqué aux paramètres locomoteurs des 247 chevaux indicés de l'étude, avec un seuil de signification de 0,05.

La puissance dorsoventrale au pas et au trot est corrélée positivement de façon significative à tous les indices élémentaires et à l'indice global « de carrière » (IRE), avec des coefficients de corrélation toutefois faibles compris entre 0,13 et 0,21. L'indice de symétrie au pas est, quant à lui, corrélé positivement de façon significative à l'indice de vitesse. Aucune autre corrélation significative n'a été démontrée, au seuil de 0,05.

Tableau 17 : Corrélations significatives entre la locomotion et les indices de performance

Paramètres locomoteurs	Allure	Indice de vitesse	Indice de classement	Indice de distance	Indice global IRE
Puissance dorsoventrale	Pas	0,16 ($p<0,05$)	0,19 ($p<0,01$)	0,16 ($p<0,05$)	0,19 ($p<0,01$)
	Trot	0,13 ($p<0,05$)	0,20 ($p<0,01$)	0,21 ($p<0,01$)	0,19 ($p<0,01$)
Symétrie	Trot	0,15 ($p<0,05$)	NS	NS	NS

III. Discussion

A. Protocole

1. Recrutement des chevaux

L'étude a été réalisée sur 251 chevaux d'endurance, nombre suffisant pour effectuer des analyses statistiques.

Les chevaux ont été sélectionnés sur la base du volontariat et non par échantillonnage, ce qui limite la représentativité d'un point de vue statistique.

Les critères de recrutement utilisés dans ce projet visent à sélectionner une population de haut niveau en endurance, concourant sur des circuits de 90 à 160 km.

Seuls les chevaux avec au moins 50% de sang arabe, donc majoritairement des pur-sang arabes et les demi-sang arabes, ont été inclus dans l'étude. Par comparaison, d'après Buffet (2013), la proportion de chevaux arabes et demi-sang arabes inscrits à des épreuves d'endurance de niveau national en 2011 s'élève à 73,2%, pourcentage qui s'élève à 85,2% si on inclut l'anglo-arabe (9,2% de participation en 2011), dont le stud-book exige un minimum de 25% de sang arabe, et le Shagya (2,8% en 2011), possédant au maximum 9 ancêtres arabes à la quatrième génération.

L'échantillon étudié est donc proche, en terme de race, de la population des chevaux d'endurance français de haut niveau.

Par ailleurs, le recrutement concerne les chevaux âgés d'au moins 7 ans. Notre échantillon couvre un intervalle de 7 à 17 ans, mais les sujets sont globalement jeunes, avec une médiane de 9 ans.

2. Méthode Equimetrix®

L'enregistrement des allures par Equimetrix® permet une analyse rapide de la locomotion, à un coût raisonnable par rapport aux autres outils d'analyse de la locomotion, et est

facilement utilisable sur un échantillon conséquent de chevaux. L'analyse de la locomotion basée sur l'exploitation des signaux d'accélération est validée, à la fois chez l'homme et chez l'animal, pour des applications cliniques (Weishaupt *et al.*, 2001 ; Auvinet *et al.*, 2002 ; Leleu *et al.*, 2004 ; Barthélémy *et al.*, 2009 ; Cottin *et al.*, 2010 ; Lopez-Sanroman *et al.*, 2012). Elle fournit des informations quantifiées, et la plupart de ces paramètres sont sensibles et robustes si l'enregistrement est fait dans des conditions expérimentales standardisées. En effet, les calculs des variables locomotrices sont plus fiables lorsque la régularité des allures permet de vérifier les conditions d'application de l'analyse de Fourier. En pratique, cela signifie que la vitesse du cheval doit être constante sur un intervalle de 15 secondes, ce qui nécessite un enregistrement sur au moins 20 secondes au pas et au trot, entre le démarrage et l'arrêt. Dans notre étude, cette condition n'a pas pu être respectée pour tous les enregistrements, notamment au trot sur les pistes les plus courtes avec l'analyse de seulement 233 enregistrements, contre 247 séquences au pas. Les conditions d'enregistrement optimales pour le test d'allure nécessitent donc une longueur de piste de 60 mètres, avec une surface plate et régulière comme de l'asphalte, du gazon, du sable ferme ou de petits gravillons compacts. Dans notre étude, l'analyse de la locomotion sur le terrain montre des limites en raison d'une absence de standardisation des pistes d'enregistrement sur les différents sites de compétition. Sur les 8 pistes utilisées, seules trois d'entre elles satisfont le critère de longueur de 60 mètres.

3. Traitement des données

a. Performances sur la course

En terme de performance sur les courses, les chevaux de notre étude sont répartis en 55,4% de classés, 35,9% d'éliminés (28,3% pour boiterie, 6,4% pour raison métabolique, 1,2% pour cause inconnue) et 8,8% d'abandons.

Cette répartition des performances des chevaux sur les courses est globalement en accord celles rapportées dans la littérature. Fielding *et al.* (2011) dénombrent les éliminations de toutes les courses d'endurance de 40 à 160 km sur l'année 2007 aux Etats-Unis et obtiennent ainsi un taux d'élimination de 18,9%, avec 312 chevaux (12,8%) éliminés pour boiterie et 147 (6,1%) éliminés pour raison métabolique. L'étude de Nagy *et al.* (2010), menée à partir des résultats de la FEI dans 9 pays, confirme ces tendances, avec, sur les

4326 couples partants, 1991 (46,0%) chevaux classés. La première cause de non-classement sur une course est l'élimination (45,9%), puis l'abandon (8,1%). La boiterie représente la cause la plus fréquente d'élimination dans tous les pays : les éliminations pour boiterie constituent 69,2% des éliminations (79% sur notre échantillon), et touchent 31,8% des chevaux partants. Les éliminations pour raison métabolique comptent pour 23,5% des éliminations (18% dans notre étude), et concernent 10,8% des participants. Le rapport entre les différentes causes d'élimination varie toutefois selon les pays, mais la boiterie reste de loin le motif principal.

b. Validité des indices de performance

Dans cette étude, la mesure de la performance en endurance sur la carrière du cheval est représentée par des valeurs quantitatives, ce qui facilite les analyses statistiques. La décomposition de l'indice de carrière (IRE) en indices élémentaires de vitesse, de classement et de distance permet d'affiner les corrélations avec les paramètres locomoteurs étudiés. De plus, les effets de l'âge et du sexe sont intégrés dans le calcul des indices.

Ainsi, les indices de performances reflètent l'ensemble des résultats en endurance du cheval, mais seulement sur les épreuves d'au moins 90 km à vitesse libre, entre 2002 et 2012. Les chevaux les plus âgés de cette étude ayant commencé leur carrière sportive en 2002, toutes leurs participations sont donc prises en compte.

Enfin, jusqu'à maintenant, seules les compétitions courues en France par des chevaux français, avec un cavalier français ou étranger, sont utilisées pour le calcul des indices de performances. Les chevaux français avec des performances dans des épreuves à l'étranger ne sont donc pas valorisés.

Ainsi, les indices de performance constituent un bon outil quantitatif pour notre étude, même s'ils ne sont pas exactement le reflet de la valeur réelle des chevaux les plus performants.

B. Résultats

1. Apport de l'étude

a. Relation entre les allures et les performances lors de l'épreuve

i. *Aspect informatif du pas*

Le trot est l'allure utilisée au cours des contrôles vétérinaires d'endurance pour détecter les asymétries de locomotion à l'origine d'élimination (FFE 2013). Pourtant, dans notre étude utilisant un capteur accélérométrique, le trot semble moins informatif pour la détection des boiteries discrètes que le pas, allure pour laquelle la régularité apparaît prédictive du résultat de la course. Cela peut tout d'abord s'expliquer par la longueur parfois insuffisante de la piste utilisée pour le test d'allure au trot : le nombre de foulées enregistrées est inférieur au trot par rapport au pas sur la même distance, ce qui ne permet pas une séquence d'enregistrement suffisante pour un calcul optimal des paramètres locomoteurs. De plus, la biomécanique du trot est par essence tellement symétrique et régulière que cette allure est moins sensible que le pas pour la détection des boiteries discrètes par accélérométrie. Au pas, dans de bonnes conditions d'enregistrement, les phases d'appui et de suspension de chaque foulée sont dissociées dans le temps et la boiterie serait ainsi plus facilement détectée par de petites irrégularités des signaux d'accélération (Weishaupt *et al.*, 2001 ; Lopez-Sanroman *et al.*, 2012).

Nos données confortent celles établies par Munoz *et al.* en 2006 sur des chevaux d'endurance, selon lesquelles la symétrie du trot avant la course ne semble pas corrélée aux performances sur la course : le pourcentage de chevaux symétriques à l'inspection initiale est élevé (supérieur à 80%) et très proche entre les différents groupes de performance. L'asymétrie au trot augmente ensuite au cours de la course, et l'utilisation d'une variable cinématique calculée par comparaison des durées de foulée entre les deux bipèdes diagonaux n'a pas permis aux auteurs d'identifier différents niveaux de performance.

ii. Intérêt prédictif de la régularité au pas

Dans notre étude, les normes des paramètres locomoteurs au pas pourraient être utilisées pour situer individuellement les chevaux d'endurance au sein de la population. En particulier, la régularité au pas fournit une information prédictive du résultat de la course, avec un groupe constitué par les abandons, à la régularité la plus faible. Selon les modèles statistiques, on peut également définir soit un groupe contenant les chevaux classés et éliminés, soit deux groupes, le premier avec les chevaux classés et éliminés pour boiterie et le second constitué par les éliminations pour raison métabolique, avec la régularité la plus élevée.

D'après Barrey *et al.* (2012, texte non publié), le fait que la régularité au pas des chevaux éliminés pour boiterie et des chevaux classés ne soit pas différente peut s'expliquer par l'absence d'engagement dans une compétition d'un cheval souffrant d'une boiterie. En effet, les coûts d'inscription et de transport poussent la majorité des cavaliers à ne pas prendre le risque d'une élimination pour boiterie dès l'inspection initiale. Ainsi, les chevaux présentant une boiterie lors de cette première inspection sont rares, et, dans notre étude, les allures sont enregistrées uniquement avant la course. On peut ainsi présumer que la plupart des chevaux éliminés pour boiterie au cours de la compétition étaient initialement sains et que ladite boiterie est apparue pendant l'épreuve. La plupart des chevaux d'endurance souffrent de lésions musculo-tendineuses ou ostéo-articulaires qui ne les empêchent pourtant pas de concourir à haut niveau (Fraipont *et al.*, 2011 ; Misheff, 2011), même si ces anomalies sous-jacentes peuvent être à l'origine de boiteries au cours de l'épreuve. De plus, l'irrégularité des sols pendant plusieurs heures de course peut suffire à déclencher une boiterie. Ainsi, nous n'observons pas de différence significative de locomotion avant la course chez les chevaux classés et éliminés pour boiterie parce qu'ils appartiennent probablement à la même population clinique avant la course.

Dans notre étude, où l'indice de régularité au pas varie entre 87 et 306, les chevaux éliminés pour raison métabolique présentent la plus haute régularité au pas, tandis que les chevaux dont les cavaliers déclarent un abandon montrent la valeur de régularité la plus basse. Plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour expliquer ce résultat au premier abord paradoxal :

- Un indice de régularité élevé, supérieur à 220 au pas, est un signe de confort, de bonne coordination et d'absence de douleur. L'entraînement d'un cheval d'endurance induit

nécessairement des atteintes musculo-squelettiques subcliniques et peut ainsi être à l'origine d'une diminution de la régularité. On peut supposer que les chevaux classés et ceux éliminés pour boiterie sont suffisamment entraînés et courent probablement au maximum de leur potentiel ; les chevaux classés seraient seulement plus tolérants aux lésions induites par l'entraînement que les chevaux éliminés pour boiterie. Un indice de régularité trop élevé avant la course pourrait en revanche révéler un niveau d'entraînement insuffisant. Ainsi, les chevaux éliminés pour cause métabolique seraient peut-être sous-entraînés, ce qui préserverait leur système musculo-squelettique et expliquerait cette forte régularité au pas avant la course retrouvée sur notre échantillon (moyenne de $245,32 \pm 9,17$).

- Une autre hypothèse est que les cavaliers adaptent la stratégie de course à la régularité du cheval avant la course : ainsi, les chevaux très réguliers avant la course pourraient être poussés au maximum de leurs possibilités sur la course, les mettant en danger sur le plan métabolique. A l'inverse, les cavaliers seraient plus précautionneux avec les chevaux irréguliers avant la course et les ménageraient davantage pour ne pas risquer d'élimination pour boiterie, les préservant ainsi d'un point de vue métabolique.

- la dernière hypothèse est que les chevaux moins réguliers pourraient d'eux-mêmes être limités dans leur performance par leur locomotion et se préserver tandis que les chevaux très réguliers seraient plus allants et se mettraient en danger sur le plan métabolique.

Toutes ces hypothèses nécessiteraient une étude plus fine, avec davantage de chevaux et en intégrant les vitesses de chevaux sur la course pour être validées ou non.

La situation des chevaux qui abandonnent est complexe à analyser car les causes d'abandon sont diverses et non répertoriées dans les résultats des courses. Les abandons peuvent avoir des origines aussi variées qu'une blessure du cavalier, une erreur de parcours ou encore un retrait du cavalier qui ne sent pas son cheval en forme. Les abandons sont plus souvent le fait de cavaliers amateurs et de couples mal préparés. La faible régularité initiale ($187,42 \pm 8,70$ ou $190,29 \pm 8,00$ selon le modèle statistique) des chevaux qui abandonnent peut aller de pair avec une qualité moindre des chevaux ou de leur préparation.

Les autres études (Schott *et al.*, 2006 ; Barnes *et al.*, 2010 ; Munoz *et al.*, 2010 ; Trigo *et al.*, 2010) montrent que les différences physiologique, biochimiques et hématologiques

entre les chevaux éliminés pour raison métabolique et les chevaux classés apparaissent uniquement pendant la course. La régularité au pas serait ainsi le premier paramètre observable avant la course et discriminant pour le résultat de la compétition.

En dehors de l'indice de régularité au pas, les autres paramètres locomoteurs ne semblent pas prédictifs de l'issue de l'épreuve.

iii. Puissance médiolatérale au pas

Les chevaux les mieux classés montrent une puissance médiolatérale plus élevée des mouvements au pas, ce qui pourrait correspondre à des chevaux plus actifs au pas, même si la corrélation reste faible et que son analyse devrait être approfondie.

b. Relation entre locomotion et carrière sportive

Enfin, notre étude a permis de décrire une relation entre la locomotion des chevaux et leur carrière sportive. Ainsi, la puissance dorsoventrale au pas et au trot est significativement corrélée positivement avec tous les indices de performance. Même si les différents coefficients de corrélation sont faibles, les chevaux les mieux indicés (en terme d'indices élémentaires et d'IRE) présentent une puissance dorsoventrale plus élevée, que ce soit au pas ou au trot. Cela signifie que les chevaux les plus performants ont une locomotion plus énergique, tandis que les chevaux moins performants se présentent avec moins de brio. Cette tendance va à l'encontre de la théorie de Barrey *et al.* (2002) selon laquelle l'économie de puissance dorsoventrale au trot serait préférable chez le cheval d'endurance pour éviter une dépense inutile d'énergie, à la différence du pas où l'on recherche plutôt une valeur élevée qui signifierait effectivement un pas actif.

Il faudrait vérifier s'il n'y a pas un effet du présentateur et si cette différence de locomotion se retrouve aussi chez le cheval monté. En effet, les meilleurs chevaux sont souvent entraînés à bien se présenter lors du contrôle vétérinaire tandis que les chevaux d'amateurs de moindre niveau sont peu ou pas entraînés à la présentation en main. Il pourrait donc y avoir un biais de présentation.

2. Limites

a. Taille de l'échantillon

La présente étude est constituée d'un échantillon notable de 251 chevaux d'endurance participant à des courses à vitesse libre. Certaines sous-catégories sont cependant peu représentées, comme celle des chevaux éliminés pour cause métabolique (6,4% de l'effectif). Toutefois, d'après Fielding *et al.* (2011), sur l'ensemble des courses de plus de 40 km aux Etats-Unis en 2007, un pourcentage comparable est retrouvé. On pourrait gagner en puissance statistique avec des effectifs équilibrés, mais ils ne reflèteraient pas la réalité des causes d'éliminations en course d'endurance. Notre étude est par ailleurs la première sur un effectif aussi conséquent à s'intéresser à l'analyse de la locomotion des chevaux d'endurance.

b. Variabilité de la piste d'enregistrement

L'effet de la piste (nature du sol, longueur) dédiée au test d'allure sur les paramètres locomoteurs est important. Il conviendrait donc de standardiser les pistes d'enregistrement pour limiter cet effet. La meilleure piste est recouverte d'un sol ferme et régulier, qu'il soit en herbe ou en sable compact, et d'une longueur suffisante pour que la séquence de trot dure 20 secondes en comprenant le départ et l'arrêt, pour disposer d'un enregistrement à vitesse constante de 15 secondes, soit 60 mètres de longueur. Ces conditions idéales sont difficiles à imposer sur le terrain où les organisateurs de compétitions doivent déjà gérer de nombreuses contraintes pour le circuit de la course et l'aire de contrôle vétérinaire.

3. Perspectives

a. Perspectives pratiques

L'utilisation de l'indice de régularité au pas avant la course, qui semble prédictif de l'issue de l'épreuve, pourrait aider à identifier, à titre préventif, les chevaux présentant un risque plus élevé d'abandon. Quelque soit le modèle statistique utilisé, les chevaux qui abandonnent la compétition présentent une régularité au pas statistiquement plus faible que les autres groupes.

Néanmoins, cette étude reste trop préliminaire pour pouvoir conclure quant à son intérêt prédictif. A l'analyse de la locomotion avant la course devrait s'ajouter un test d'allure à

un stade plus avancé de l'épreuve pour préciser les relations entre locomotion et performance sur la course.

De plus, l'analyse objective du pas et du trot par accélérométrie pourrait être comparée directement au jugement visuel et subjectif du vétérinaire, au cours de l'inspection vétérinaire. Elle pourrait ainsi être utilisée dans les cas litigieux de boiterie où les experts n'arrivent pas à un consensus, en fournissant un jugement quantitatif des irrégularités des signaux d'accélération mesurés par le capteur accélérométrique.

b. Perspectives scientifiques

Cette étude se poursuit actuellement dans le projet GenEndurance avec des enregistrements d'allures sur les jeunes chevaux d'endurance de 4 à 6 ans. L'objectif est de déterminer si les allures en début de carrière sont prédictives des performances ultérieures des chevaux. Le rôle de l'entraînement dans l'optimisation des allures du cheval d'endurance pourra ainsi être étudié.

Les chevaux dont les allures ont été analysées ici ont fait l'objet d'un génotypage sur puce 74.000K. Plusieurs SNP sont apparus comme significativement associés à la performance. Des analyses sont en cours pour déterminer les gènes susceptibles d'être concernés. Ces résultats vont être mis en regard des paramètres de la locomotion que nous avons calculés afin de déterminer un éventuel support génétique dans les caractéristiques du pas et du trot.

Les études futures devront toutefois veiller à utiliser une piste d'enregistrement standardisée afin de limiter l'effet de la nature du sol et de la longueur sur les paramètres locomoteurs et d'augmenter la reproductibilité du test d'allure.

Enfin, pour compléter l'analyse de la relation entre la locomotion du cheval et ses performances sur la course, l'interaction dynamique entre le cheval et son cavalier devrait également être étudiée au cours de la compétition avec l'analyse des allures montées et être comparée aux résultats du couple (Viry *et al.*, 2013).

CONCLUSION

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet de recherche GenEndurance, au sein duquel la morphologie, la locomotion, évaluée par accélérométrie, et les profils génomiques des chevaux d'endurance sont mis en relation avec leurs performances. L'étude morphométrique, présentée par Tribout en 2013, a montré que quelques caractéristiques de conformation avaient un faible lien avec les performances. Cette thèse présente le deuxième volet du projet, à savoir l'étude de la relation entre la locomotion et, d'une part, les performances sur la course contemporaine des mesures, et, d'autre part, la carrière sportive des chevaux de l'échantillon.

L'analyse accélérométrique de la locomotion des chevaux d'endurance avant la course révèle que le pas est une allure plus informative que le trot. L'indice de régularité au pas apparaît comme un facteur prédictif de l'issue de la compétition. Cet indice pourrait donc être utilisé à titre préventif pour identifier les sujets présentant un risque élevé d'abandon. L'hétérogénéité des pistes sur lesquelles les allures ont été enregistrées est grande et l'effet piste apparaît comme très significatif, pouvant masquer les effets des allures. Toute nouvelle étude visant à vérifier les résultats obtenus ici ou à généraliser l'analyse des allures chez les chevaux d'endurance devrait donc minimiser l'effet piste par l'usage d'un seul type de sol et d'une longueur de piste de 60 mètres minimum.

Par ailleurs, en matière de carrière sportive, cette étude a mis en évidence une tendance significative des chevaux avec de hauts indices à présenter une puissance dorsoventrale plus élevée, aussi bien au pas qu'au trot.

BIBLIOGRAPHIE

American Association of Equine Practitioners (AAEP) Guide for veterinary service and judging of equestrian events. 4th ed., Lexington (KY), 1991, 19p.

Association nationale française du Cheval Arabe pur-sang et demi sang (ACA) [en ligne] [<http://www.acafrance.org/>] (consulté le 16/12/13)

AUVINET B, BERRUT G, TOUZARD C, MOUTEL L, COLLET N, CHALEIL D *et al.* Reference data for normal subjects obtained with an accelerometric device. *Gait and Posture* 2, 2002, 124-134.

BAILLY C. Validation d'un système accélérométrique de quantification des boiteries chez le trotteur attelé dans les conditions de l'exercice sportif intense. Thèse Méd. Vét., Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort, Maisons-Alfort, 2009, 103p.

BARNES A, KINGSTON J, BEETSON S, KUIPER C. Endurance veterinarians detect physiologically compromised horses in a 160 km ride. *Equine Vet. J. Suppl.*, 2010, **38**, 6-11.

BARREY E. Evaluation de l'aptitude sportive chez le cheval : application à la définition de critères précoces de sélection. *INRA Prod. Anim.* hors-série « Eléments de génétique quantitative et application aux populations animales », 1992, 167-173.

BARREY E, HERMELIN M, VAUDELIN JL, POIREL D, VALETTE JP. Utilisation of an accelerometric device in equine gait analysis. *Equine Vet J Suppl.*, 1994, **17**, 7-12.

BARREY E, DESBROSSE F. Lameness detection using an accelerometric device. *Pferheilkunde*, 1996, **12**, 617-622.

BARREY E. Methods, applications and limitations of gait analysis in horses. *Vet. J.*, 1999, **157**, 7-122.

BARREY E, EVANS SE, EVANS DL, CURTIS RA, QUINTON R, ROSE RJ. Locomotion evaluation for racing in Thoroughbreds. *Equine Vet. J.*, 2001, Suppl. 33, 99-103.

BARREY E, DESLIENS F, POIREL D, BIAU S, LEMAIRE S, RIVERO JL L, LANGLOIS B. Early evaluation of dressage ability in different breeds. *Equine Vet. J.*, 2002, Suppl. 34, 319-324

BARREY E. Caractériser le cheval d'endurance. Comité d'orientation scientifique et technique des Haras Nationaux, Lettre n°10, octobre 2003.

BARREY E, COLIN DE VERDIERE J, MATA X, SCHIBLER L, ROBERT C. Pre-ride gait variables and risk for elimination in endurance rides. 2012, non publié.

BARTHELEMY I, BARREY E, THIBAUD JL, URIARTE A, VOIT T, BLOT S, HOGREL JY. Gait analysis using accelerometry in dystrophin-deficient dogs. *Neuromuscular Disorders*, 2009, **19**, 788-796.

BENAMOU-SMITH A, ROBERT C, BARREY E. Time-induced changes in haematological et biochemical parameters over a 140 km endurance race in a group of national level horses. In : 7th ICEEP. Fontainebleau, France, 2006.

BUFFET A. Pourcentage et nombre de chevaux classés dans les 5 premiers par année et par race, 2013 [en ligne] [<http://www.endurance-pedigrees.com/Races.aspx>] (Consulté le 29/09/13)

BOUDON JP. Interview. Cheval-Savoir, n°24 sept 2011 [en ligne] [<http://www.cheval-savoir.com/694-interview-boudon-cheval-endurance-os-tendons-muscles>] (Consulté le 30/09/13)

CAUMONT A. Le choix du cheval d'endurance, d'après Pierre Cazes, 1998 [en ligne] [<http://www.hippoplus.com/hippodico/endurance/choix.htm>] (Consulté le 30/09/13)

Centaure Metrix [en ligne] [<http://www.centaure-metrix.com>] (Consulté le 12/10/13)

CHATEAU H, ROBIN D, FALADA S, POURCELOT P, VALETTE JP, RAVARY B *et al.* Effects of a synthetic all-weather waxed track versus a crushed sand track on 3D acceleration of the front hoof in three horses trotting at high speed. *Equine Vet. J.*, 2009, **41**, 247-251.

CHATEAU H, HOLDEN L, ROBIN D, FALADA S, POURCELOT P, ESTOUP P *et al.* Biomechanical analysis of hoof landing and stride parameters in harness trotter horses running on different tracks of a sand beach (from wet to dry) and on an asphalt road. *Equine Vet. J.*, 2010, **42** (Suppl. 38), 488-495.

CLAYTON HM, SCHAMHARDT HC. Measurements techniques for gait analysis. In : Back W, Clayton H (Ed). *Equine Locomotion*. Philadelphia : W.B. Saunders, 2001, 55-76.

COTTIN F, METAYER N, GOACHET AG, JULLIAND V, SLAWINSKI J, BILLAT V *et al.* Oxygen consumption and gait variables of Arabian endurance horses measured during a field exercise test. *Equine Vet. J.*, 2010, **42** (38), 1-5.

COUROUCE-MALBLANC A. La médecine sportive appliquée au cheval athlète. Ecole Nationale Vétérinaire de Nantes, unité pédagogique de pathologie équine, 2011, 113 p.

CULP WT, MAYHEW PD, BROWN DC. The effect of laparoscopic versus open ovariectomy on postsurgical activity in small dogs. *Vet. Surg.*, 2009, **38**, 811-817.

DREVEMO S, FREDRICKSON I, HJERTÉN G, MCMIKEN D. Early development of gait asymmetries in trotting standardbred colts. *Equine Vet. J.*, 1987, **19**(3), 189-91.

DUBOIS C. Modélisation des programmes de sélection dans l'élevage du cheval de sport français. Thèse AgroParisTech, 2007, 275p.

DUFOSSET JM, LANGLOIS B. Analyse statistique du geste à l'obstacle de 122 chevaux de selle français et intérêt du jugement du saut en liberté. *In : C.E.R.E.O.P.A.*, 10^e journée d'étude, 7 mars 1984 : 2-26.

Fédération Française d'Equitation. Règlement des épreuves d'endurance 2013 [en ligne] [<http://www.ffe.com/Disciplines-Equestres/General/Endurance/Reglement>] (Consulté le 20/01/13)

FRAIPONT A, VAN ERCK E, RAMERY E, RICHARD E, DENOIX JM, LEKEUX P *et al.* Subclinical diseases underlying poor performance in endurance horses: diagnostic methods and predictive tests. *Vet. Rec*, 2011, **169**(6), 154.

FRAIPONT A, VAN ERCK E, RAMERY E, FORTIER G, LEKEUX P, ART T. Assessing fitness in endurance horses. *Can. Vet. J.*, 2012, **53**, 311–314.

GARLINGHOUSE S, BURRIL M. Relationship of body condition score to completion rate during 160 km endurance races. *Equine vet. J. Suppl.*, 1999, **30**, 591-595.

HEWETSON M, CHRISTLY RM, HUNT ID, VOUTE LC. Investigations of the reliability of observational gait analysis for the assessment of lameness in horses. *Vet. Rec.*, 2006, **158** (25), 852–8.

HOLBROOK TC. The endurance horse. *In*: Wiley-Blackwell (editors). *Adam's and Stashak's lameness in horses*. 6th ed., Chichester, GBR, 2011, 1055-1061.

HOLDEN-DOUILLY L , POURCELOT P, DESQUILBET L, FALALA S, CREVIER-DENOIX N, CHATEAU H. Equine hoof slip distance during trot at training speed: comparison between kinematic and accelerometric measurement techniques. *Vet. J.*, 2013, **197** (2), 198-204.

Institut Français du Cheval et de l'Équitation (IFCE) Les indices endurance [en ligne] [<http://www.haras-nationaux.fr/information/accueil-equipaedia/genetique/les-indices/indices-endurance.html>] (Consulté le 01/10/13)

ISHIHARA A, BERTONE AL, RAJALA-SCHULTZ PJ. Association between subjective lameness grade and kinetic gait parameters in horses with experimentally induced forelimb lameness. *Am. J. Vet. Res.*, 2005, **66**, 1805–15.

JEFFCOT LB, ROSSDALE PD, FREESTONE J, FRANCK CJ, TOWERS-CLARK PF. An assessment of wastage in Thoroughbred racing from conception to 4 years of age. *Equine Vet. J.*, 1982, **14**, 185-198.

KEEGAN KG, WILSON DA, WILSON DJ, SMITH B, GAUGHAN EM, PLEASANT RS *et al.* Evaluation of mild lameness in horses trotting on a treadmill: agreement by clinicians and interns or residents and correlation of their assessments with kinematic gait analysis. *Am. J. Vet. Res.*, 1998, **59** (11), 1370–7.

KEEGAN KG, YONEZAWA Y, PAI PF, WILSON DA, KRAMER J. Evaluation of a sensor-based system of motion analysis for detection and quantification of forelimb and hind limb lameness in horses. *Am. J. Vet. Res.*, 2004, **65**(5), 665-70.

KEEGAN KG. Evidence-Based Lameness Detection and Quantification. *Vet. Clin. N. Am. Equine*, 2007, **23**, 403–423.

KEEGAN KG, DENT EV, WILSON DA, JANICEK J, KRAMER J, LACARRUBBA A *et al.* Repeatability of subjective evaluation of lameness in horses. *Equine Vet. J.*, 2010, **42** (2), 92-97.

KEEGAN KG, KRAMER J, YONEZAWA Y, MAKI H, PAI PF, DENT EV *et al.* Assessment of repeatability of a wireless, inertial sensor-based lameness evaluation system for horses. *Am. J. Vet. Res.*, 2011, **72** (9), 1156-63.

- KEEGAN K, KRAMER J, YONEZAWA Y, MAKI H, PAI PF, DENT EV *et al.* Assessment of repeatability of a wireless, inertial sensor-based lameness evaluation system for horses. *Am J. Vet. Res*, 2011, **72**, 1156-1163.
- LANGLOIS B, POIREL D, TASTU D, ROSE J. Analyse statistique et génétique des gains des pur-sang anglais de trois ans dans les courses plates françaises. *Ann. Génét. Sél. Anim.*, 1975, **7**(4), 387-408.
- LANGLOIS CC. Développement de troubles métaboliques chez les chevaux d'endurance lors de courses de longue distance : étude épidémiologique sur les épreuves françaises en 2003. Thèse Méd. Vét., Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort, Maisons-Alfort, 2006, 117p.
- LAWRENCE LM, JACKSON S, KLINE K. Observations on body weight and condition of horses in a 150-mile endurance ride. *J. Equine Vet. Sci.*, 1992, **12**, 320-324.
- LELEU C, BARILLER F, COTREL C, BARREY E. Reproducibility of a locomotor test for trotter horses. *Vet. J.*, 2004, **168**, 160-166.
- LOPEZ-RIVERO JL, AGUERA E, MONTERDE JG. Comparative of muscle fiber type composition in the middle gluteal muscle of Andalusian, thoroughbred and Arabian horses. *J. Equine Vet. Sci.*, 1989, **9**, 337-340.
- LOPEZ-SANROMAN FJ, HOLMBAK-PETERSEN R, SANTIAGO I, GOMEZ DE SEGURA IA, BARREY E. Gait analysis using 3d accelerometry in horses sedated with xylazine. *Vet. J.*, 2012, **193**, 212-216.
- MARLIN D, NANKERVIS K. Thermoregulation. *In : Equine exercise physiology*. Blackwell Science, Oxford, 2002, 296p.
- MARLIN DJ, McEWEN J, SLUYTER F. Completion and treatment rates in modern endurance racing. *In: Proceedings of the 4th International Equitation Science Conference*, Dublin, 2008.
- MARTINO J, POURCELOT P, FALALA S, CAMUS M, HOLDEN-DOUILLY L, CHATEAU H *et al.* Estimation of longitudinal hoof slip displacement at the canter on two different track surfaces using accelerometric and kinematic methods: a preliminary comparative study with one horse. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 2013, **16**, suppl. 1, 139-141.

MCBRIDE S, MILLS D. Psychological factors affecting equine performance. *BMC Veterinary Research*, 2012, **8**:180.

MCCRACKEN MJ, KRAMER J, KEEGAN KG, LOPES M, WILSON DA *et al.* Comparison of an inertial sensor system of lameness quantification with subjective lameness evaluation. *Equine Vet J.*, 2012, **44**(6):652-6.

MENAGER S. Méthode d'évaluation du poids chez le cheval d'endurance. Détermination expérimentale du « poids de forme ». Thèse Méd. Vét., Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort, Maisons-Alfort, 2010, 74p.

MERKENS HW, SCHAMHARDT HC (a). Distribution of ground reaction forces of the concurrently loaded limbs in Dutch Warmblood horse at the normal walk. *Equine Vet. J.*, 1988, **20**, 209–13.

MERKENS HW, SCHAMHARDT HC (b). Evaluation of equine locomotion during different degrees of experimentally induced lameness. II. Distribution of ground reaction force patterns of the concurrently loaded limbs. *Equine Vet. J. Suppl.*, Sept 1988, **6**, 107–12.

METAYER N, BIAU S, COCHET JL, BARREY E. Etude des facteurs locomoteurs et morphologiques de la performance du cheval d'endurance. *In : 30^e journée de la recherche équine*, Paris, 3 mars 2004, 67-76.

MEYRIER S. Les causes d'élimination en épreuves d'endurance équestre : étude rétrospective menée en France en 2001. Thèse Méd. Vét., Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse, 2003, 90 p.

MISHEFF MM. Lameness in endurance horses. *In : Ross MW, Dyson SJ (editors). Diagnosis and management of lameness in the horse. 2nd edition*, Saunders-Elsevier, 2011, 1137-1149.

MISHEFF MM, ALEXANDER GR, HIRST GR. Management of fractures in endurance horses. *Equine Vet. Ed.*, 2010, **22**: 623–630.

MORRIS EA, SEEHERMAN HJ. Redistribution of ground reaction forces in experimentally induced carpal lameness. *In: Gillespie JR, NE Robinson NE (editors). Equine Exercise Physiology 2*, ICEEP Publications, Davis, California, 1987, 553-563.

MOURRA E. Sémiologie de l'examen locomoteur et des affections locomotrices chez le cheval : réalisation d'un cd-rom d'une base de données cliniques et vidéographiques. Thèse Méd. Vét., Vetagro sup, Lyon, 2012, 175p.

MUÑOZ A, CUESTA I, RIBER C, GATA J, TRIGO P, CASTEJÓN FM. Trot asymmetry in relation to physical performance and metabolism in equine endurance rides. *Equine Vet. J. Suppl.*, 2006, **36**, 50-54.

MUÑOZ A, RIBER C, TRIGO P, CASTEJÓN-RIBER C, CASTEJÓN FM. Dehydration, electrolyte imbalances and renin-angiotensin-aldosterone-vasopressin axis in successful and unsuccessful endurance horses. *Equine Vet J Suppl.*, 2010, **38**, 83-90.

NAGY A, MURRAY JK, DYSON S. Elimination from elite endurance rides in nine countries: a preliminary study. *Equine vet. J.*, 2010, **42** (38), 637-643.

PEHAM C, LICKA T, MAYR A, SCHEIDL M, GIRTLER D. Speed dependency of motion pattern consistency. *J. Biomech.* 1998, **31**(9):769-72.

PERSSON SGB, ESSÉN-GUSTAVSSON B, LINDHOLM A. Energy profile and the locomotor pattern of trotting on an inclined treadmill. In: S.G.B. Persson SGB, Lindholm A, Jeffcott LB (editors). *Equine Exercise Physiology 3*. ICEEP Publications, Davis, 1991, 239-244.

POURCELOT P, DEGUEURCE C, AUDIGIE F, DENOIX JM, GEIGER D (a). Kinematic analysis of the locomotion symmetry of sound horses at a slow trot. *Equine vet. J. Suppl.*, 1997, **23**, 93-96.

POURCELOT P, DEGUEURCE C, AUDIGIE F, DENOIX JM, GEIGER D (b). Kinematic symmetry index: a method for quantifying the horse locomotion symmetry using kinematic data. *Vet. Res.*, 1997, **28**, 525-538.

PRINCE A, GEOR R, HARRIS P, HOEKSTRA K, GARDNER S, HUDSON C *et al.* Comparison of the metabolic responses of trained Arabians and Thoroughbreds during high- and low-intensity exercise. *Equine Vet. J. Suppl.*, 2002, **34**, 95-99.

RICARD A, TOUVAIS M. Des indices pour l'endurance ? *Equ'idée*, 2005, n°53, 42-44.

RIVERO JLL, RUZ MC, SERRANO AL, DIZ AM. Effects of a 3 month endurance training programme on skeletal muscle histochemistry in Andalusian, Arabian and Anglo-Arabian horses. *Equine Vet. J.*, 1995, **27**, 51-59.

RIVERO JLL, SERRANO AL, QUIROZ-ROTHER E, AGUILERA-TEJERO E. Coordinated changes of kinematics and muscle fiber properties with prolonged endurance training. *Equine Vet. J. Suppl.*, 2001, **33**, 104-108.

ROBERT C, BENAMOU-SMITH A, LECLERC JL. Use of the recovery check in long-distance endurance rides. *Equine Vet. J. Suppl.*, 2002, **34**, 106-111.

ROBERT C. Les soins au cours des épreuves d'endurance équestre. *Prat. Vét. Equine*, 2009, **41**(161): 31-40.

RONEUS N, ESSÉN-GUSTAVSSO B, JOHNSTON C, DREVEMO S, PERSSON S. Lactate response to maximal exercise on the track: relation to muscle characteristics and kinematic variables. *Equine Vet. J.*, 1995, **18**, 191-194.

SCHOTT HC 2ND, MARLIN DJ, GEOR RJ, HOLBROOK TC, DEATON CM, VINCENT T *et al.* Changes in selected physiological and laboratory measurements in elite horses competing in a 160 km endurance ride. *Equine Vet J Suppl.*, 2006, **36**, 37-42.

SCHUBACK K, ESSÉN-GUSTAVSSON B, PERSSON SGB. Incremental treadmill exercise until onset of fatigue and its relationship to metabolic response and locomotor pattern. *Equine Vet. J.*, 1999, **30**, 337-341.

SEGUIN A. Contrôles vétérinaires en course d'endurance : critères d'alerte. *In : Proceeding de l'AVEF : Session endurance.* 2007. Deauville, 130-132.

SIEGEL A. Analyse de la locomotion du cheval par un procédé accélérométrique : application à la quantification des boiteries. Thèse Méd. Vét., Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort, Maisons-Alfort, 2001, 142 p.

THOMAS C. Eliminations sur les courses d'endurance de 120 à 160 km en France de 2003 à 2007 : contribution à la détermination de nouveaux critères de risque. Thèse. Méd. Vét., Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort, Maisons-Alfort, 2010, 80p.

THOMSEN MH, PERSSON AB, JENSEN AT, SORENSEN H, ANDERSEN PH. Agreement between accelerometric symmetry scores and clinical lameness scores during

experimentally induced transient distension of the metacarpophalangeal joint in horses. *Equine Vet. J. Suppl.*, 2010, **42**, 510-515.

TRIBOUT P. Etude morphométrique du cheval d'endurance de race arabe et croisé arabe en relation avec la performance. Thèse Méd. Vét., Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort, Maisons-Alfort, 2013, 94p.

TRIGO P, CASTEJON F, RIBER C, MUÑOZ A. Use of biochemical parameters to predict metabolic elimination in endurance rides. *Equine Vet J Suppl.*, 2010, **38**, 142-6.

USDA. National economic cost of equine lameness, colic, and equine protozoal myeloencephalitis in the United States. USDA:APHIS:VS, National Health Monitoring System. Information sheet. Fort Collins (CO): October, 2001. #N348.1001.

VERRIER E. Qu'est-ce que l'amélioration génétique, pourquoi et comment améliorer les races ? *Equ'idée*, 2011, n°75, 55-68.

WATT JR, FRANZ JR, JACKSON K, DICHARRY J, RILEY PO, KERRIGAN DC. A three-dimensional kinematic and kinetic comparison of overground and treadmill walking in healthy elderly subjects. *Clinical Biomechanics*, 2010, **25**, 444-449.

WEISHAUP MA, HOGG HP, WOESTNER T, DEMUTH DC, AUER JA. Development of a technique for measuring ground reaction force in the equine on a treadmill. *In : Abstract of the 3rd International Conference Equine Locomotion*, Saumur, France, 1996.

WEISHAUP MA, WIESTNER T, HOGG HP, JORDAN P, AUER JA, BARREY E. Assessment of gait irregularities in the horse : eye vs. gait analysis. *Equine Vet. J. Suppl.*, 2001, **33**, 135-140.

WEISHAUP MA, HOGG HP, WIESTNER T, DENOTH J, STÜSSI E, AUER JA. Instrumented treadmill for measuring vertical ground reaction forces in horses. *Am. J. Vet. Res.*, 2002, **63**(4):520-7.

WEISHAUP MA, WIESTNER T, HOGG HP, JORDAN P, AUER JA. Compensatory load redistribution of horses with induced weight bearing hindlimb lameness trotting on a treadmill. *Equine Vet. J.*, 2004, **36**(8):727-33.

WEISHAUP T MA, WIESTNER T, HOGG HP, JORDAN P, AUER JA. Compensatory load redistribution of horses with induced weight-bearing forelimb lameness trotting on a treadmill. *Vet. J.*, 2006, **171**(1),135-46.

WICKLER SJ, GREENE HM, EGAN K, ASTUDILLO A, DUTTO DJ, HOYT DF. Stride parameters and hindlimb length in horses fatigued on a treadmill and at an endurance ride. *Equine Vet. J. Suppl.*, 2006, **36**, 60-64.

CARACTÉRISATION DE LA LOCOMOTION DU CHEVAL D'ENDURANCE : CRITÈRES ASSOCIÉS À LA PERFORMANCE EN COURSE À VITESSE LIBRE

NOM et Prénom : COLIN DE VERDIERE Julie

Résumé :

L'examen locomoteur, consistant à détecter visuellement les boiteries aux différents stades de la compétition, est essentiel en endurance équestre. La boiterie représente la première cause d'élimination dans cette discipline.

L'objectif de cette étude est d'analyser la relation entre la locomotion, quantifiée par accélérométrie, et les performances, au cours de la compétition qui suit le test d'allure d'une part, et sur l'ensemble de la carrière sportive des chevaux d'endurance d'autre part. Ainsi, dans le cadre du projet de recherche GenEndurance, 251 chevaux ont été examinés la veille de sept compétitions d'endurance de 90 à 160 km. L'évaluation de la locomotion au pas et au trot en main a été réalisée à l'aide d'un accéléromètre tridimensionnel placé contre le sternum du cheval, puis les données ainsi recueillies ont été traitées par le logiciel Equimetrix®. L'association statistique entre les allures et le résultat de la compétition a été testée par une analyse de variance à plusieurs facteurs. Un test de corrélation a été utilisé pour étudier la relation entre la locomotion et la carrière sportive des chevaux, quantifiée par des indices endurance développés par l'INRA.

Après correction de l'effet de la piste dédiée au test d'allure (nature du sol et longueur) sur les paramètres locomoteurs, l'indice de régularité au pas semble prédictif du résultat de la compétition : les chevaux dont les cavaliers abandonnent la course présentent une régularité au pas significativement plus basse tandis que les chevaux éliminés pour raison métabolique montrent une régularité significativement plus élevée que les participants classés et éliminés pour boiterie.

Par ailleurs, l'étude de la corrélation entre locomotion et carrière sportive révèle que les chevaux avec de hauts indices présentent une puissance dorsoventrale significativement plus élevée.

Mots-clés : ENDURANCE, BOITERIE, LOCOMOTION, ACCÉLÉROMÉTRIE, PERFORMANCE, EQUIDÉ, CHEVAL, CHEVAL DE SPORT.

Jury :

Président : Pr

Directeur : Dr Céline ROBERT

Assesseur : Pr Fabrice AUDIGIE

Invité : Dr Eric BARREY

CHARACTERIZATION OF LOCOMOTION OF ENDURANCE HORSE: CRITERIA RELATED TO THE PERFORMANCE IN FREE SPEED RIDES

SURNAME : COLIN DE VERDIERE

Given name : Julie

Summary :

Gait inspection based on visual detection of lameness at different stages of the competition is prominent in endurance rides. Lameness is the primary cause of elimination.

Using gait variables quantified by accelerometry, the objective of this study was to assess the relationship between locomotion and performance, defined both during the competition that follows the gait test and by the sporting career in high-level endurance horses. As part of the GenEndurance research project, 251 horses were examined the day before the ride in seven endurance competitions from 90 to 160 km in length. The gait assessment at walk and trot in hand was performed using a three-dimensional accelerometer applied against the sternum of the horse and the database was processed by Equimetrix® software. The statistical association between pre-ride gait variables and the outcome of the competition was tested by several-factors analysis of variance. A correlation test was used to examine the relationship between locomotion and sporting career, which was quantified by performance indices developed by INRA.

After adjusting for the effect of the track (ground surface and length) on gait variables, the regularity index at walk appeared to be predictive of the outcome of the competition : horses retired from the race significantly exhibited the lowest regularity and horses eliminated for metabolic reason showed a significantly higher regularity than the group of placed and disqualified for lameness horses together.

Furthermore, the correlation analysis between gait and sporting career revealed that horses with high performance indices had a significantly higher dorsoventral power.

Keywords : ENDURANCE, LAMENESS, LOCOMOTION, ACCELEROMETRY, PERFORMANCE, EQUINE, HORSE, SPORT HORSE.

Jury :

President : Pr.

Director : Dr Céline ROBERT

Assessor : Pr Fabrice AUDIGIE

Guest : Dr Eric BARREY