Contribution à l'estimation de la dépense énergétique liée à l'exercice chez le cheval trotteur attelé : utilisation des mesures de consommation d'oxygène et de fréquence cardiaque en conditions de terrain

Justine Fortier

▶ **To cite this version:**

Justine Fortier. Contribution à l'estimation de la dépense énergétique liée à l'exercice chez le cheval trotteur attelé : utilisation des mesures de consommation d'oxygène et de fréquence cardiaque en conditions de terrain. Biologie animale. Université de Bourgogne, 2014. Français. NNT : 2014DIJOS056 . tel-01141974

HAL Id: tel-01141974
https://theses.hal.science/tel-01141974

Submitted on 14 Apr 2015

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

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

UNIVERSITE DE BOURGOGNE

AGROSUPDIJON URANIE – USC Nutrition du Cheval Athlète

ECOLE DOCTORALE ENVIRONNEMENT SANTE

THESE

En vue de l'obtention du grade de docteur de l'Université de Bourgogne

en sciences de la vie

Présentée et soutenue par

Justine FORTIER

le 13 octobre 2014

CONTRIBUTION A L'ESTIMATION DE LA DEPENSE ENERGETIQUE LIEE A L'EXERCICE CHEZ LE CHEVAL TROTTEUR ATTELE :

Utilisation des mesures de consommation d'oxygène et de fréquence cardiaque en conditions de terrain

---

Directrice de thèse : **Véronique JULLIAND**

Co-encadrantes de thèse : **Anne-Gaëlle GOACHET & Gaëlle DELEY**

Membres du jury :

Tatiana ART (Rapporteur)	Professeur	Faculté de Médecine Vétérinaire de Liège
Serge BERTHOIN (Rapporteur)	Professeur	Université de Lille 2
Jean NOBLET (Membre invité)	Professeur	INRA Rennes

UNIVERSITE DE BOURGOGNE

AGROSUPDIJON URANIE – USC Nutrition du Cheval Athlète

ECOLE DOCTORALE ENVIRONNEMENT SANTE

THESE

En vue de l'obtention du grade de docteur de l'Université de Bourgogne

en sciences de la vie

Présentée et soutenue par

Justine FORTIER

le 13 octobre 2014

CONTRIBUTION A L'ESTIMATION DE LA DEPENSE ENERGETIQUE LIEE A L'EXERCICE CHEZ LE CHEVAL TROTTEUR ATTELE :

Utilisation des mesures de consommation d'oxygène et de fréquence cardiaque en conditions de terrain

---

Directrice de thèse : **Véronique JULLIAND**

Co-encadrantes de thèse : **Anne-Gaëlle GOACHET & Gaëlle DELEY**

Membres du jury :

Tatiana ART (Rapporteur)	Professeur	Faculté de Médecine Vétérinaire de Liège
Serge BERTHOIN (Rapporteur)	Professeur	Université de Lille 2
Jean NOBLET (Membre invité)	Professeur	INRA Rennes

« Le sport va chercher la peur pour la dominer,
la fatigue pour en triompher, la difficulté pour la vaincre. »

Pierre de Coubertin

A tous les chevaux qui ont partagé ma vie, du quotidien aux compétitions.

Remerciements

A Madame ART et Monsieur BERTHOIN, pour avoir spontanément accepté la tâche de rapporteurs de ma thèse. J'espère que mon travail sera digne de votre intérêt.

A Jean NOBLET, vous avez activement participé à ce projet de thèse en étant membre du comité de thèse et aujourd'hui membre du jury. J'ai bénéficié au cours de ces trois années de vos conseils avisés et je vous en suis profondément reconnaissante. J'espère que le travail présenté sera à la hauteur de vos attentes.

A Véronique JULLIAND, vous m'avez ouvert les portes de votre équipe en acceptant d'être directrice de ma thèse. Vous avez fait preuve d'une grande confiance à mon égard, j'espère très sincèrement l'avoir honorée. Je vous remercie d'avoir si activement contribué à ma formation et pour m'avoir confié un projet à cheval entre deux disciplines. Je vous exprime ici toute ma reconnaissance.

A Anne-Gaëlle GOACHET, pour avoir été, depuis maintenant quatre ans, à mes côtés. Pour tous nos échanges et discussions sur le monde du cheval. Je vous remercie pour votre soutien pendant toute la thèse.

A Gaëlle DELEY, tu as toujours été là pour apporter ton soutien, tes connaissances et ta patience. Tu as accepté le co-encadrement de cette thèse cheval, qui je l'espère aura été aussi riche pour toi qu'il l'a été pour moi. Un grand merci et j'espère très sincèrement que nos chemins se recroiseront.

A Messieurs Manfred COENEN et Romuald LEPERS, pour vos actives participations aux comités de thèse. Vous avez toujours répondu présents et avez apporté toute votre expertise. Je vous remercie très sincèrement d'avoir participé à ce projet de thèse.

A Monsieur Martin VAN DEN BERG, je ne peux que penser à vous quand il s'agit de remerciements. Comment vous témoigner toute ma reconnaissance pour votre disponibilité, vos conseils et votre gentillesse ! Votre expertise sur le K4b² aura été indispensable, un grand merci.

A la famille COLLAUD, à Fred, vous avez joué un rôle si précieux. Merci pour toutes ces discussions sur les chevaux et les courses. Merci de m'avoir fait découvrir le monde du trot !

A l’équipe de recherche, je tiens chaleureusement à remercier toute les membres de l’équipe de recherche pour votre accueil et votre soutien dans ce projet d’équipe. Un merci particulier à Stéphane, sans qui les manips à Vénarey ne se seraient pas aussi bien déroulées. Sans qui l’attente au bord de la piste n’aurait pas été réchauffée par un petit café. Je te remercie sincèrement de ton aide. Je tiens également à remercier Noémie et Vincent, mes deux stagiaires BTS pour leur active participation. De tout cœur, je vous souhaite bonne continuation.
Enfin, je garde une pensée particulière aux trotteurs qui ont joué un rôle majeur en acceptant le masque et en réalisant tous les tests : Palace, Peldo, Radjah, Soleil, Sprinter et enfin Ulin. Je ne vous oublierai pas, vous aurez été mon premier contact avec l’univers du trot.

A mes amies, les Lau Lo, je n’oublie pas votre soutien sans faille tout au long de la thèse. De notre premier été ensemble à nos relations à distance, parce que les communications téléphoniques et le chat gmail me donnaient un petit coup de pouce à chaque fois. Je vous remercie de votre amitié. Vous êtes probablement mes plus belles rencontres dans ce parcours de thèse.

A ma future belle famille, je vous adresse de chaleureux remerciements, pour votre accueil auprès des vôtres, pour m’avoir initié au golf mais aussi pour tous ces moments bien agréables passés en votre compagnie.

A ma famille, bien sûr, ce travail n’aurait pas pu aboutir sans votre soutien moral et psychologique. Voilà une dure tâche que vous avez accomplie avec succès. A Doudounet et Doudounette, pour votre soutien ensoleillé de la côte d’Azur. A mes sœurs, Vio et Alex. Vio, même si les Seychelles c’était loin, nous avons gardé contact et chacun de tes appels envoyés un peu de soleil et de chaleur. A toi, Alex, ma grande sœur chérie (c’est écrit !), je ne saurais assez te prouver toute ma reconnaissance pour ton écoute, tes conseils et tes coups de booste, qui mieux que toi aurait pu tenir ce rôle ! A toi maman, sans qui ce quatuor ne serait pas complet. Parce que tout ça c’est grâce à toi et surtout le cheval. A ces longs moments où je t’écoutais raconter ton aventure africaine à cheval. Dans cette thèse il y a un peu de toi. A Lucien, tout a commencé avec Idole puis la grande aventure avec Jalon a commencé et aujourd’hui Asta prend la relève. Parce que tu as tant donné pour m’apprendre à monter à cheval, pour toutes ces heures à répéter pour que « mon cerveau devienne le sien, et le sien devienne le mien », pour ces moments de remise en question et de joie, parfois de pleurs en sortie de piste (Rodez restera marqué !). Un grand merci !

Et enfin à toi, mon chéri. Pour tout l’amour et l’attention que tu m’apportes sans retenue. Pour m’avoir soutenue, écoutée et supportée pendant la dernière ligne droite. Parce que ton implication a été sans faille, cette thèse est la nôtre.

Table des matières

Table des illustrations ***4***

Liste des sigles & Abréviations ***7***

Publications & Communications ***9***

INTRODUCTION GENERALE ***10***

ETAT DE L'ART ***14***

PARTIE 1 ..... ***19***

L'étude du métabolisme énergétique à l'exercice chez le cheval trotteur ***19***

1.1 L'effort du cheval trotteur 20
- 1.1.1 La discipline des courses au trot 20
- 1.1.2 L'effort en course 21
- 1.1.3 L'effort en situation d'entraînement 21

1.2 Le métabolisme énergétique et l'exercice chez le cheval trotteur 25
- 1.2.1 La sollicitation des métabolismes énergétiques lors d'un effort 26
- 1.2.2 Les métabolismes énergétiques en course au trot 33
- 1.2.3 Les métabolismes énergétiques en situation d'entraînement de trot 34

PARTIE 2 ..... ***36***

Les marqueurs physiologiques de la dépense énergétique liée à l'exercice chez le cheval trotteur ***36***

2.1 La fréquence cardiaque 37

2.2 Les échanges respiratoires 38
- 2.2.1 La consommation d'oxygène 39
- 2.2.2 Le dioxyde de carbone rejeté 40
- 2.2.3 Le quotient respiratoire 41

2.3 La concentration sanguine en lactate 43

PARTIE 3 ..... ***45***

Les méthodes de mesure de la dépense énergique liée à l'exercice chez le cheval trotteur ***45***

3.1 L'approche indirecte de la dépense énergétique à partir de la fréquence cardiaque 46
- 3.1.1 La relation VO_2/FC 46
- 3.1.2 Les tests d'efforts incrémentaux 47

3.2 La méthode de calorimétrie indirecte à partir de la consommation d'oxygène 53
- 3.2.1 Le système de collecte totale avec valve de non-retour (non-rebreathing valve) 53
- 3.2.2 Les systèmes de collecte en circuit ouvert (open flow, bias flow systems) 54

3.3 Les méthodes de calorimétrie indirecte et de l'eau doublement marquée à partir du volume de dioxyde de carbone 57

3.4 L'approche de la dépense d'énergie anaérobie à partir de la lactatémie 59

PROBLEMATIQUE & OBJECTIFS DE LA THESE 60

SYNTHESE EXPERIMENTALE 63

La méthodologie générale 66

1.1 Les animaux et leur conduite 67
1.1.1 Les chevaux trotteurs du centre d'entraînement de Grosbois 67
1.1.2 Les chevaux trotteurs en situation expérimentale contrôlée 68

1.2 Les tests d'efforts 72
1.2.1 Les tests incrémentaux continus 72
1.2.2 Les tests v500 73
1.2.3 Les tests promenade, jogging, parcours et interval 73

1.3 Les mesures et les calculs 73
1.3.1 Les données de vitesses 73
1.3.2 Les données cardiorespiratoires 74
1.3.3 Les prélèvements et mesures de lactatémie 76
1.3.4 Les mesures de température rectale 77
1.3.5 Les calculs de dépense énergétique 77

1.4 Le traitement statistique 78

CHAPITRE 1 79

Description et caractérisation des exercices d'entraînement du cheval trotteur attelé 79

1.1 La description des pratiques d'entraînement 80

1.2 La caractérisation des exercices d'entraînement 80

1.3 Les résultats et discussion 80
1.3.1 Les pratiques et exercices d'entraînement 80
1.3.2 La détermination de la v500 des chevaux de Grosbois 91
1.3.3 La caractérisation de l'intensité des exercices d'entraînement en fonction de la v500 91

CHAPITRE 2 93

Mise au point d'un test d'effort incrémental et de la relation individuelle VO_2/FC 93

2.1 Le test d'effort incrémental continu 94

2.2 La relation VO_2/FC 94

2.3 Les résultats et discussion 94
2.3.1 La mise au point d'un test incrémental continu en condition de terrain 94
2.3.2 La détermination de la relation VO_2/FC 103

CHAPITRE 3 107

Quantification de la dépense énergétique liée aux exercices 107

3.1 La quantification de la dépense énergétique d'exercice à partir de mesures de VO_2 ... 108

3.2 La comparaison de méthodes de quantification de la dépense énergétique liée à l'exercice : mesures directes de VO_2 *vs.* VO_2 estimée à partir de mesures de FC 108

3.3 Les résultats et discussion 108
3.1.1 La quantification de la dépense énergétique au cours des exercices d'entraînement 108
3.1.2 La comparaison de méthodes d'estimation de la dépense énergétique au cours des exercices d'entraînement 118

DISCUSSION GENERALE 131

1. Les apports méthodologiques préalables 132

2. L'estimation de la dépense énergétique liée aux exercices d'entraînement 136

3. L'estimation de la dépense énergétique totale du cheval trotteur 142

CONCLUSION & PERSPECTIVES 149

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 152

ANNEXES 168

1. Questionnaire sur les pratiques d'entraînement réalisé au centre d'entraînement de Grosbois 169

2. Tableau de données cardiorespiratoires pic obtenues au cours des deux tests incrémentaux T1 et T1 pour cinq chevaux trotteurs maintenus en conditions expérimentales contrôlées 181

3. Tableau de données cardiorespiratoires obtenues au cours de l'exercice promenade pour les six chevaux trotteurs maintenus en conditions expérimentales contrôlées 182

4. Tableau de données cardiorespiratoires obtenues au cours de l'exercice jogging pour les six chevaux trotteurs maintenus en conditions expérimentales contrôlées 183

5.1 Tableau de données cardiorespiratoires obtenues au cours de l'exercice parcours pour les six chevaux trotteurs maintenus en conditions expérimentales contrôlées 184

5.2 Tableau de données cardiorespiratoires obtenues au cours de l'exercice parcours pour les six chevaux trotteurs maintenus en conditions expérimentales contrôlées 185

6.1 Tableau de données cardiorespiratoires obtenues au cours de l'exercice interval pour les six chevaux trotteurs maintenus en conditions expérimentales contrôlées 186

6.2 Tableau de données cardiorespiratoires obtenues au cours de l'exercice interval pour les six chevaux trotteurs maintenus en conditions expérimentales contrôlées 187

7 Tableau des dépenses énergétiques (kJ) au cours des quatre exercices (promenade, jogging, parcours et interval) et des trois phases d'exercice (échauffement, exercice et récupération) obtenues chez les six chevaux trotteurs maintenus en conditions expérimentales contrôlées 188

8 Tableau des dépenses énergétiques (kJ), calculées à partir de la consommation d'oxygène (VO_2) et estimées à partir de la fréquence cardiaque (FC) et de la relation VO_2/FC, au cours des quatre exercices (promenade, jogging, parcours et interval) et des trois phases d'exercice (échauffement, exercice et récupération) obtenues chez les six chevaux trotteurs maintenus en conditions expérimentales contrôlées. 190

Table des illustrations

TABLEAUX

Etat de l'art

Tableau 1. Dépense énergétiques dans différentes activités physiques (d'après Wilmore et al., 2009). 17

Tableau 2. Classification des activités physiques chez l'homme et chez le cheval, en multiples de la dépense énergétique de repos (d'après Vermorel *et al.*, 1984 ; ANC, 2001 ; Potier de Courcy *et al.*, 2003 ; Martin-Rosset, 2012)..... 18

Tableau 3. Sélection de données issues des études descriptives sur les pratiques d'entraînement des chevaux trotteurs. 24

Tableau 4. Caractéristiques descriptives des entraînements des trotteurs (d'après Mos, 2006)..... 25

Tableau 5. Source de production énergétique et leurs caractéristiques (d'après Pradet 1989 ; Couroucé, 1993). 27

Tableau 6. Equivalence calorique du quotient respiratoire (QR) et % kcal issu des glucides et lipides (d'après Wilmore *et al.*, 2009). 42

Tableau 7. Tests d'effort de terrain existant dans la littérature chez le cheval trotteur. 52

Problématique

Tableau 8. Estimation de la dépense énergétique du cheval trotteur (d'après Martin-Rosset, 2012). . 62

Synthèse expérimentale

Tableau 9. Descriptif du dispositif expérimental et valorisation des données. 65

Tableau 10. Caractéristiques des chevaux trotteurs de Grosbois lors des essais 1a et 1b. 67

Tableau 11. Caractéristiques biométriques des chevaux en situation expérimentale contrôlée lors des essais 2,3 et 4. 69

Tableau 12. Composition biochimique de l'aliment DP Puissance distribué aux trotteurs en situation expérimentale contrôlée. 70

Tableau 13. Exemple d'une semaine type d'entraînement réalisée par les chevaux trotteurs maintenus en condition expérimentale contrôlée..... 71

Tableau 14. Descriptif des tests utilisés au cours des quatre essais.. 72

Publication 1

Table 1. Characteristics of trainers surveyed according to their status. 84

Table 2. Mean number (± standard deviation) of trotters per stable in 2011 by their age according to trainers' estimates. 84

Table 3. Characteristics of the warm up and recovery periods for unqualified trotters (UT) and qualified trotters (QT) used during 'parcours' and 'interval' exercises according to trainers' estimates. 85

Table 4. Coefficients of correlation of trainers characteristics and weekly workload of unqualified and qualified trotters. 87

Tableau 15. Descriptif des exercices spécifiques utilisés dans l'entraînement des trotteurs non qualifiés (UT) et qualifiés (QT)..... 92

Publication 2
Table 1. Effects of two continuous incremental field exercise tests (T1 and T2) on peak cardiorespiratory parameters and plasma lactate concentration. 100

Tableau 16. Relation individuelle entre la consommation d'oxygène et la fréquence cardiaque (VO_2/FC) établie au cours des deux tests incrémentaux continus (T1 et T2) chez cinq chevaux trotteurs maintenus en condition expérimentale contrôlée. 103
Tableau 17. Relations individuelles entre la consommation d'oxygène et la fréquence cardiaque (VO_2/FC) établie au cours du test incrémental T1 selon trois méthodes de calculs chez cinq chevaux trotteurs maintenus en condition expérimentale contrôlée. 105

Publication 3
Table 1. Characteristics of the four testing situations. 111
Table 2. Physiological responses of Standardbred trotters during the four testing situations. 113
Table 3. Estimation of energy expended in six Standardbreds submitted to four different testing situations. 113

Publication courte 4
Table 1. Characteristics of the promenade, jogging, parcours and interval exercises and their different phases i.e. warm-up, exercise and recovery. 129
Table 2. Physiological responses of Standardbred trotters during the four specific exercises used in trotters training 130

Discussion générale
Tableau 18. Estimation du métabolisme de base (MB) d'un cheval trotteur hongre de 475 kg en fonction de son poids vif (PV) rapporté au poids métabolique et des majorations en fonction de la race et de l'entraînement (d'après Vermorel *et al.*, 1984 ; NRC, 2007 ; Coenen *et al.*, 2011 et Martin-Rosset, 2012). 144
Tableau 19. Dépense énergétique (DE en kcal) liée aux quatre exercices spécifiques utilisés chez les chevaux trotteurs par séance de travail. 145
Tableau 20. Coefficients multiplicateurs exprimés en multiples des besoins liés au métabolisme de base, estimés par les systèmes de recommandations, pour chaque exercice d'entraînement chez le cheval trotteur. 146
Tableau 21. Classification des activités physiques chez le cheval trotteur attelé, en multiples de la dépense du métabolisme de base (d'après Vermorel *et al.*, 1984 ; NRC, 2007). 146
Tableau 22. Dépense énergétique par séance de travail et hebdomadaire (DE en kcal) liée aux quatre exercices spécifiques utilisés chez les chevaux trotteurs 148

FIGURES

Etat de l'art
Figure 1. Contribution des diverses voies métaboliques en fonction du temps d'effort 26
Figure 2. Production d'énergie (ATP) par la glycolyse : transformation du glucose et glycogène en acide pyruvique puis acide lactique. 29
Figure 3. Production oxydative de l'ATP. 30
Figure 4. Cycle de l'acide citrique (cycle de Krebs). 31
Figure 5. Oxydation totale des acides gras non estérifiés. 32

Figure 6. Filières énergétiques contribuant à la synthèse de l'ATP au cours de l'effort. 34
Figure 7. Evolution de la ventilation lors d'un effort progressivement croissant chez un cheval trotteur, illustrant le concept de seuil ventilatoire (SV) (d'après des données personnelles). 41
Figure 8. Utilisation du sac de Douglas chez un cheval au repos (d'après Marlin et Nankervis, 2002). 54
Figure 9. Utilisation du K4b² (Cosmed, Rome, Italie) sur des athlètes humain (d'après www.cosmed.com) et équin (d'après des données personnelles). 56
Figure 10. Cinétique de disparition des isotopes ^{2}H et ^{18}O (d'après Gastinger, 2010). 58

Synthèse expérimentale
Figure 11. Utilisation du K4b² équin et de l'Equimask sur un cheval trotteur maintenu 75
Figure 12. Prélèvement sanguin post effort sur un cheval trotteur 77

Publication 1
Figure 1. Duration (mean ± standard deviation) of the four different exercise types for unqualified (UT) and qualified trotters (QT) according to trainers' estimates. 84
Figure 2. Speeds (mean ± standard deviation) of the four different exercise types for unqualified (UT) and qualified trotters (QT) according to trainers' estimates. 85
Figure 3. Weekly frequencies (mean ± standard deviation) of the four different exercise types for unqualified (UT) and qualified trotters (QT) according to trainers' estimates. 85
Figure 4. Results principal component analysis. 86

Publication 2
Figure 1. A Standardbred trotter exercising a field test with the Equimask connected to the portable gas analyser K4b² with his battery fixed on the sulky 97
Figure 2. Pulmonary oxygen uptake (VO_2, expressed in ml/min/kg) (A) and heart rate (HR) (B) as a function of velocity (expressed as a percentage of vVO_{2peak}) in five Standardbred trotters during protocols T1 (black blocks) and T2 (white blocks). 98
Figure 3. Heart rate-oxygen consumption relationship (VO_2, expressed in ml/min/kg) during test T1 (black blocks) and test T2 (white blocks) for a representative horse. 99

Publication 3
Supplementary Figure S1. A Standardbred trotter exercising a parcours with the Equimask connected to the portable gas analyser K4b² with his battery fixed on the sulky. 117

Discussion générale
Figure 13. Comparaison des données physiologiques de consommation d'oxygène (VO_2, ml/min/kg), de dioxyde de carbone rejeté (VCO_2, ml/min/kg), de ventilation (V_E, l/min) et de fréquence respiratoire (Fr, respiration/min) en fonction de la vitesse d'exercice (m/s) obtenues lors de l'essai 2 (publication 2) sur les cinq chevaux trotteurs maintenus en condition expérimentale contrôlée (mettre les carrée directement (□) avec les données de la littérature toutes races et conditions confondues (■) 137

Liste des sigles & Abréviations

ADP	Adénosine Diphosphate
AGNE	Acide Gras Non Estérifiés
AMP	Adénosine Monophosphate
ATP	Adénosine Triphosphate
Bpm	Battement par minute
CO_2	Dioxyde de carbone
CK	Créatine Kinase
DE	Dépense Energétique
DMOA	Déficit maximal d'oxygène accumulé
EPOC	Excès de consommation d'oxygène post-exercice
ET	Ecart type
FAD	Flavine Adénine Dinucléotide
FC	Fréquence Cardiaque
FC_{max}	Fréquence Cardiaque maximale
FC_{pic}	Fréquence Cardiaque pic
$FeCO_2$	Pourcentage de dioxyde de carbone dans l'air expiré
FeO_2	Pourcentage d'oxygène dans l'air expiré
$FiCO_2$	Pourcentage de dioxyde de carbone dans l'air inspiré
FiO_2	Pourcentage d'oxygène dans l'air inspiré
Fr	Fréquence respiratoire
h	Heure
H^+	Ion hydrogène
H_2O	Molécule d'eau
INRA	Institut National de la Recherche Agronomique
K^+	Ion potassium
kcal	Kilocalorie
kg	Kilogramme
kj	Kilojoule
km	Kilomètre
l	Litre
$[La^-]$	Concentration sanguine en ion lactate
m	Mètre
MADC	Matière Azotée Digestible Cheval
MAOD	Maximum Accumulated Oxygen Deficit
MB	Métabolisme de base
min	Minute
ml	Millilitre
mmol	Millimole
MS	Matière sèche
Na^+	Ion sodium
NAD	Nicotinamide Adénine Dinucléotide
NEC	Note d'Etat Corporel
O_2	Oxygène
Pi	Phosphate inorganique
PCr	Phosphocréatine
PV	Poids Vif
QR	Quotient Respiratoire
QT	Cheval trotteur qualifié
s	Seconde
SECF	Société d'Encouragement à l'Elevage du Cheval Français
SV	Seuil ventilatoire

UFC	Unité Fourragère Cheval
UT	Cheval trotteur non qualifié
v500	Vitesse moyenne et maximale sur 500m
VCO_2	Production de dioxyde de carbone
VCO_{2pic}	Production de dioxyde de carbone pic
V_E	Débit ventilatoire
VMA	Vitesse Maximale Aérobie
VO_2	Consommation d'oxygène
VO_{2max}	Consommation maximale d'oxygène
VO_{2pic}	Consommation d'oxygène pic
V_T	Volume courant
vVO_{2max}	Vitesse à VO_{2max}
vVO_{2pic}	Vitesse à VO_{2pic}

Publications & Communications

Articles scientifiques dans des revues internationales à comité de relecture

Fortier J., Julliand V., Harris P.A. and Goachet A.G., 2014. Training management of Standardbred trotters: a field survey in France. Comparative Exercise Physiology 10, 63-71.

Fortier J., Goachet A.G., Julliand V. and Deley D., 2014. Effects of two field continuous incremental tests on cardiorespiratory responses in Standardbred trotters. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition, DOI: 10.1111/jpn.12242.

Fortier J., Deley D., Goachet A.G. and Julliand V., 2014. Quantification of the energy expenditure during training exercises in Standardbred trotters. Animal, article sous presse, doi:10.1017/S1751731114003139.

Fortier J., Deley D., Julliand V. and Goachet A.G., 2014. Technical note: Comparison of two methods to quantify exercise energy expenditure in Standardbred trotters. Article soumis à Journal of Animal Science, accepté avec majeures révisions le 12 septembre 2014.

Communications orales et écrites dans des congrès scientifiques

Fortier J., Goachet A.G., Julliand V. and Deley D., 2012. Faisabilité de la mesure de VO2max chez le cheval trotteur en conditions de terrain. Forum des Jeunes Chercheurs, Besançon, France.

Fortier J., Goachet A.G., Julliand V. and Deley D., 2013. Estimating energy expenditure from VO2 measurements during a field submaximal exercise in Standardbred trotters. Equine Science Society Symposium, New Mexico, USA.

Fortier J., Julliand V., Harris P.A. and Goachet A.G., 2013. Current feeding and exercise practices the day of the race in French Standardbred trotters. Equine Science Society Symposium, New Mexico, USA.

Fortier J., Goachet A.G., Deley G. and Julliand V., 2014. Quantification of energy expenditure in field conditions: comparison of direct VO_2 vs. VO_2 prediction from heart rate measurements. 9th International Conference of Equine Exercise Physiology, Chester, UK (poster).

INTRODUCTION GENERALE

Chez l'homme, les recommandations alimentaires et énergétiques sont précisées dans les principaux pays occidentaux par des comités d'experts, selon des critères fondés à la fois sur des données scientifiques et sur des éléments liés à la politique nutritionnelle et agroalimentaire propre à chacun de ces pays. En France, deux éditions de ces recommandations définies par l'Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments (AFSSA), celles de 1989 et de 1992 (Dupin *et al.*, 1992), ont précédé les Apports Nutritionnels Conseillés (ANC) de 2001 (ANC, 2001). Les recommended dietary allowances (RDA) des États-Unis, datant de 1989, étaient l'équivalent des ANC français et ont été réactualisés entre 1998 et 2001 sous le vocable dietary recommended intakes (DRI) (DRI, 2001). L'ensemble de ces recommandations a avant tout un objectif de santé publique et s'adresse plus particulièrement aux nutritionnistes, médecins, chercheurs ou épidémiologistes, aux autorités sanitaires mais également aux industries agroalimentaires. Les recommandations énergétiques préconisées par ces systèmes sont basées sur une évaluation des dépenses énergétiques. L'évaluation de la dépense énergétique est couramment réalisée à partir des mesures directes (calorimétrie directe et indirecte) mais aussi à partir de méthodes dites indirectes (méthode factorielle, méthode des accéléromètres, etc.). (Potier de Courcy *et al.*, 2003). Cette évaluation permet de préciser la dépense énergétique de populations ciblées dans des conditions de vie habituelle (personnes âgées, adolescents, nourrissons) ou extrêmes (sportifs). Pour plus de précision, une échelle simplifiée répertoriant le niveau d'activité physique (NAP), en fonction du type d'activité quotidienne dont la pratique sportive est une sous-catégorie, a été proposée (Vermorel *et al.*, 2001). Cette échelle permet d'évaluer le NAP de plus de 100 types d'activités quotidiennes et sportives et ainsi d'adapter les besoins énergétiques nécessaires à chaque individu. Des ANC spécifiques aux adultes sportifs et aux enfants et adolescents sportifs de haut niveau de performance ont en outre été développés. Ils présentent l'intérêt de tenir compte de l'intensité réelle et de la durée effective des activités physiques et sportives. Ces valeurs représentent des moyennes indicatives pour un sport déterminé et à l'échelle d'une semaine. Elles doivent être adaptées à chaque individu et modulées en fonction de la durée et de l'intensité des entraînements et des compétitions. Exceptés pour certains sports, il a été montré que les activités sportives de haut niveau entraînent une augmentation de la dépense énergétique journalière de l'ordre de 20 à 30 % à l'échelle d'une semaine chez des individus sportifs à haut niveau (ANC, 2001).

Chez le cheval, longtemps considéré comme animal de rente et/ou outil de travail, les recommandations alimentaires et énergétiques étaient basées sur des systèmes nutritionnels établis chez les ruminants. Bien qu'herbivores comme les ruminants, les chevaux présentent des spécificités qui ont nécessité la mise en place de systèmes nutritionnels adaptés. Les principaux sont le système anglo-saxon du National Research Council, datant de 1981 et révisé en 2007 (NRC, 1981 ; NRC, 2007), le système allemand établi en 1994 et actualisé en 2011 (GEH, 1994 ; Coenen *et al.*, 2011) et le système français développé par l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) dont les premières recommandations sont apparues en 1984 (INRA, 1984) et ont été actualisées en 1990

(INRA, 1990) et en 2012 (Martin-Rosset, 2012) sur la base des travaux antérieurs de l'INRA. Ces systèmes, basés sur des principes d'expression de l'énergie différents (énergie digestible pour le NRC, énergie métabolisable pour le GEH et énergie nette pour le système français) proposent des recommandations pour les apports énergétiques du cheval. Les tables de recommandations françaises de 1984 présentaient les bases scientifiques en termes de recommandations nutritionnelles et énergétiques pour les chevaux (Vermorel *et al.*, 1984). En 1990, ces recommandations et leurs conditions d'applications ont été précisées dans un ouvrage exposant les bases actualisées des systèmes nutritionnels INRA, des besoins nutritionnels des animaux et des apports alimentaires recommandés (INRA, 1990). Récemment, Martin-Rosset (Martin-Rosset, 2012) a proposé de nouvelles précisions pour les éleveurs, entraîneurs et cavaliers dans le choix des constituants énergétiques de la ration alimentaire. Les recommandations énergétiques préconisées par le système français sont principalement basées sur une estimation des dépenses énergétiques. Cette estimation est couramment réalisée à partir d'une méthode dite globale où la quantité d'énergie nécessaire pour maintenir un cheval adulte à poids constant est recherchée. La seconde méthode d'estimation de la dépense énergétique s'appuie sur des équations préalablement établis par calorimétrie indirecte (Gottlieb-Vedi *et al.*, 1991 ; Eaton *et al.*, 1995), permettant d'approcher la dépense énergétique. L'évolution des recommandations énergétiques des chevaux s'est opérée suivant leur utilisation. Si auparavant les chevaux étaient considérés comme animaux de rente, ils sont aujourd'hui principalement utilisés à des fins de performances sportives et sont considérés comme des athlètes complets capables de performer dans de multiples disciplines. C'est pourquoi récemment les systèmes ont été révisés en se rapprochant des nouveaux besoins nutritionnels des chevaux sportifs. Pour cela, les systèmes NRC, GEH et INRA ont proposé de majorer les besoins énergétiques en fonction de l'activité physique réalisée par les chevaux. Par exemple, le NRC catégorise les efforts selon une échelle allant d'une activité physique « légère » à « très élevée » (NRC, 2007). Le système INRA propose également une classification de l'activité physique en cinq catégories de travail variant de « très léger », « léger », « moyen », « intense » à « très intense ». Cette classification a été proposée pour deux catégories de chevaux à savoir les chevaux de selle et les chevaux de trait (Vermorel *et al.*, 1984). Le récent ouvrage de Martin-Rosset (2012) complète les besoins énergétiques pour différentes disciplines équestres et hippiques en proposant une estimation de la dépense énergétique totale.

Néanmoins, d'après les travaux issus de la physiologie à l'exercice chez le cheval (Vermorel *et al.*, 1984), chaque discipline et ses exercices spécifiques induisent une dépense énergétique propre, comme chez l'homme (Laville, 2006). Cette dépense énergétique est directement liée aux caractéristiques mêmes de l'activité (principaux groupes musculaires mobilisés) et des exercices. L'étude des besoins énergétiques des chevaux athlètes nécessite alors d'investiguer les dépenses énergétiques induite par les cinquantaines de disciplines équestres et hippiques et par les exercices qu'elles utilisent à l'entraînement. Ainsi, les connaissances actuelles en termes de dépense énergétique des chevaux athlètes doivent être complétées.

C'est dans ce souci de précision des besoins énergétiques pour les équins que l'unité de recherche URANIE-USC Nutrition du Cheval Athlète a initié des travaux de recherche visant à quantifier en conditions de terrain, par calorimétrie indirecte *i.e.* mesure de la consommation d'oxygène, la dépense énergétique des chevaux athlètes. Les premiers essais ont concerné la discipline de l'endurance et plus récemment, l'unité de recherche a étendu ses travaux à la discipline du trot attelé. Ce travail de thèse s'est centré sur la discipline du trot attelé et a été mené au sein de l'unité de recherche URANIE-USC Nutrition du Cheval Athlète, grâce au soutien financier de l'Institut National de la Recherche Agronomique et de la Région Bourgogne afin de préciser la dépense énergétique induite par l'activité physique du cheval trotteur en conditions réelles d'exercice.

La première partie de ce manuscrit sera consacrée à un état de l'art sur l'étude du métabolisme énergétique du cheval trotteur au cours des différents efforts qu'il réalise (course et entraînement) en se référant aux données physiologiques connues chez l'athlète humain et chez le cheval de course (trot et galop). Après avoir présenté les marqueurs physiologiques permettant de quantifier la dépense énergétique liée à l'exercice, nous aborderons les méthodes de quantification énergétique utilisables chez les chevaux à l'exercice. La deuxième partie de ce travail présentera la stratégie expérimentale adoptée pour répondre aux objectifs de thèse ainsi que les résultats obtenus. Une troisième partie sera consacrée à la discussion des résultats et sera suivie par le développement des principales conclusions et perspectives de ce mémoire de thèse.

ETAT DE L'ART

Les besoins énergétiques appropriés pour un athlète, humain ou équin, peuvent se définir comme ceux qui mènent à un équilibre entre l'absorption calorique et la dépense calorique de sorte que le maintien de la santé et la performance physique soient garantis (Folli, 1999). La somme des dépenses énergétiques est composée de l'énergie indispensable au métabolisme de base (MB) selon le stade physiologique (croissance, gestation, …), à la thermogenèse et à l'activité physique.

Le métabolisme de base, souvent associé au métabolisme de repos, correspond à l'énergie nécessaire pour assurer les fonctions vitales de l'organisme, c'est-à-dire le travail des pompes membranaires nécessaire pour maintenir les gradients ioniques, le renouvellement des constituants de l'organisme mais aussi l'énergie pour assurer le travail cardiaque et respiratoire (Vermorel *et al.*, 1984 ; Martin, 2001). Chez l'homme, le métabolisme de base est mesuré chez un individu à jeun, couché, éveillé et en thermoneutralité. Chez le cheval, le métabolisme de base correspond à la dépense énergétique de l'animal à jeun, au repos dans sa zone de neutralité thermique (en zone tempérée, cette zone se situe de + 5°C à + 25°C) ayant peu d'opportunité pour exercer toute activité (Coenen *et al.*, 2011). Il est d'ailleurs usuellement utilisé le terme de besoins d'entretien du cheval qui correspondent à la quantité d'énergie nécessaire pour couvrir les dépenses correspondant à la vie et à l'activité d'un cheval qui n'assure aucune production ou travail et se maintient à poids constant et sans variation de composition corporelle (Vermorel *et al.*, 1984).

Il existe une grande variabilité interindividuelle du métabolisme de base. L'âge, le sexe et la composition corporelle sont à l'origine de la majeure partie de cette variabilité autant chez l'homme (Nelson *et al.*, 1992 ; Black *et al.*, 1996 ; Tappy et Guenat, 2000) que chez le cheval (Nadal'jak, 1961 ; Kossila *et al.*, 1972 ; Kearns *et al.*, 2002). La pratique d'exercices répétés entraîne une augmentation du métabolisme de base. Les travaux de Sjödin *et al.*, (1996) ont indiqué que le métabolisme de base d'athlètes en endurance de haut niveau était significativement supérieur aux calculs théoriques (16 %, $P < 0,05$). Chez le cheval, les systèmes de recommandations s'accordent pour majorer le métabolisme de base en période de travail et selon le type de travail fourni allant de + 15 à + 35 % (Kearns *et al.*, 2002 ; NRC, 2007 ; Martin-Rosset, 2012). De plus, la race des équidés peut considérablement augmenter le métabolisme de base de 10 % (Vermorel *et al.*, 1984 ; Coenen *et al.*, 2011 ; Martin-Rosset, 2012) ou 20 % (NRC, 2007) pour les chevaux dits « de sang » comme les chevaux de course trotteurs ou galopeurs.

Au métabolisme de base s'ajoutent les dépenses liées à la thermogenèse alimentaire autant chez l'homme (Laville, 2006) que chez le cheval (Vermorel *et al.*, 1984). La prise alimentaire augmente les dépenses énergétiques de l'individu au repos de manière proportionnelle à la quantité ingérée (Laville, 2006). Cette thermogenèse diffère selon le type d'aliment et est en majeure partie expliquée par le coût énergétique associé à l'absorption intestinale, au stockage et à la transformation des aliments (Flatt, 1978) ; données à notre connaissance peu documentées chez le cheval.

L'activité physique est l'un des principaux facteurs de variations de la dépense et des besoins énergétiques des hommes et des chevaux. L'activité physique est un phénomène complexe qui se caractérise par son type (quelle activité physique), sa durée (pendant combien de temps), sa fréquence (quelle régularité et quel fractionnement), son intensité (quelle vitesse et quel investissement physique) et son contexte (quel environnement) (Folli, 1999). C'est une composante de la dépense énergétique très variable puisqu'elle dépend du comportement des individus, de leur mode de vie et de leur activité. Les systèmes de recommandations chez l'homme ont défini cinq contextes dans lesquels l'activité physique peut se dérouler: lit ou fauteuil ; travail assis, déplacements et activités de loisirs faibles ; travail assis, déplacements faibles et activités de loisirs peu fatigantes ; travail debout ; et enfin travail et activités physiques de loisirs intenses (Potier de Courcy *et al.*, 2003). Pour chacune de ces activités quotidiennes ont été quantifiées des dépenses énergétiques moyennes spécifiques aux activités physiques chez des sujets adultes (Tableau 1). Par exemple, l'énergie dépensée dans les activités physiques intermittentes (c'est-à-dire des sports d'équipe comme par exemple le football ou le hockey sur glace) varie considérablement en fonction de la discipline sportive, de la position de l'athlète au sein de l'équipe, de l'intensité et de la durée de l'épreuve; par conséquent les besoins énergétiques de ces athlètes sont très variables (Ekblom, 1986). Les athlètes impliqués dans des activités d'intensité plus modérée mais de plus longue durée (par exemple les sports d'endurance tels que cyclisme, marathon, ou d'ultra-endurance, comme le duathlon ou le triathlon…) nécessitent un large apport calorique quotidien afin de compenser leur dépense énergétique élevée (Folli, 1999). Tout manquement à cette exigence se soldera probablement par une perte de la masse pondérale, ce qui peut être contre-performant chez des athlètes dont la masse corporelle est déjà adaptée au type d'effort (Pate et Branch, 1992).

Tableau 1. Dépense énergétiques dans différentes activités physiques (d'après Wilmore *et al.*, 2009).

Activités	Rapportée au poids du corps (kcal/kg/min)
Basket-ball	0,123
Cyclisme :	
11,3 km/h	0,071
16,1 km/h	0,107
Hand-ball	0,157
Course à pied :	
12,1 km/h	0,200
16,1 km/h	0,260
Station assise	0,024
Sommeil	0,017
Station debout	0,026
Natation (crawl) 4,8 km/h	0,285
Tennis	0,101
Marche, 5,6 km/h	0,071
Haltérophilie	0,117
Lutte	0,187

Comme pour l'homme, les systèmes de recommandations énergétiques pour les chevaux ont défini des grandes catégories de travail. Pour le système français, cette appréciation du travail a été réalisée en étudiant le type d'utilisation des chevaux (chevaux de trait et chevaux de selle de loisirs) qui renseigne sur la nature des activités physiques pour les chevaux de trait et de selle uniquement : reprise pour cavaliers débutants en manège, travail en terrain varié, saut d'obstacles, etc. La nature du travail a été définie par les allures du cheval (pas, trot, galop aux vitesses dites classiques soit 7, 14 et 21 km/h respectivement) et par le franchissement d'obstacles. Les vitesses utilisées sont celles indiquées dans le manuel de la Fédération Française d'Equitation ou ont été mesurées (INRA, 1990). La quantité de travail effectuée dépend de son intensité et de sa durée. Dans le cas des chevaux de sport et de loisir, la quantité est généralement appréciée à l'échelle de la journée puis de la semaine. L'intensité du travail pour chaque type d'utilisation du cheval a été définie par heure de travail : c'est la somme des durées des séquences de travail effectuées successivement aux différentes allures et aux vitesses correspondantes. Cette appréciation conduite chez des chevaux travaillant en manège ou à l'extérieur a permis de distinguer quatre intensités de travail : très légère, légère, moyenne et intense (INRA, 1990). Pour les chevaux trotteurs, les dernières révisions proposées par Martin-Rosset (2012) précise la classification des exercices de travail pour les chevaux de courses. Celle-ci, basée sur les pratiques de terrain observées chez des entraîneurs de chevaux trotteurs aux USA (Lovell, 1994), distingue trois

phases de travail utilisées pour entraîner les chevaux : adaptation, foncier et vitesse. Chacune de ces phases est composée d'exercices de joggings réalisés à des intensités et distances variables.

L'addition de ces trois principales composantes de la dépense énergétique (métabolisme de base, thermogénèse et activité physique) constituent la dépense énergétique totale quotidienne d'un individu. Elle se calcule couramment à partir du métabolisme de base, multiplié par le niveau d'activité physique exprimé en coefficient de multiplication du métabolisme de base autant chez l'homme que chez le cheval (Vermorel *et al.*, 1984 ; ANC, 2001) (Tableau 2).

Tableau 2. Classification des activités physiques chez l'homme et chez le cheval, en multiples de la dépense énergétique de repos (d'après Vermorel *et al.*, 1984 ; ANC, 2001 ; Potier de Courcy *et al.*, 2003 ; Martin-Rosset, 2012).

Homme (ANC, 2001 ; Potier de Courcy *et al.*, 2003)		**Cheval** (Vermorel *et al.*, 1984 ; Martin-Rosset, 2012)	
Multiple de la DE entretien	**Activités**	**Multiple de la DE entretien**	**Activités**
1,2 - 1,3	Lit ou fauteuil	1,3	Très légère
1,4 - 1,5	Travail assis, déplacements et activités de loisirs faibles	1,7	Légère
1,6 - 1,7	Travail assis, déplacements faibles et activités de loisirs peu fatigantes	1,8	Modérée
1,8 - 1,9	Travail debout	1,9	Elevée
2,2 - 2,4	Travail ou activités physiques de loisirs intenses	2	Très élevée

Néanmoins, comme nous venons de l'évoquer, les travaux d'estimation de la dépense énergétique chez les athlètes humains sont diversifiés et spécifiques aux disciplines. Ainsi, à partir des recommandations établies par les systèmes, les besoins énergétiques des athlètes sont complétés pour répondre aux exigences de leur pratique. Chez le cheval, si les systèmes de recommandations actuels tendent à définir les besoins énergétiques en fonction de catégories d'efforts, il semble néanmoins qu'ils présentent la limite de ne proposer des recommandations que pour certaines disciplines (Vermorel *et al.*, 1984) et de ne pas assez prendre en compte les spécificités des exercices pratiqués.

PARTIE 1

L'étude du métabolisme énergétique à l'exercice chez le cheval trotteur

1.1 L'effort du cheval trotteur

1.1.1 La discipline des courses au trot

La Société d'Encouragement à l'élevage du Cheval Français (SECF), créée en 1864, est la Société-Mère des courses au trot en France. Sa principale mission est d'œuvrer au développement des courses au trot en France et à la protection de la race Trotteur Français. Cette société accomplit une triple action. Elle élabore d'abord la réglementation interne des courses et délivre aux professionnels les autorisations d'entraîner, de faire courir et de monter ou de « driver ». Elle établit ensuite le programme des courses et fixe les conditions imposées à ceux qui y participent. Enfin, elle attribue les « encouragements » aux vainqueurs et répartit les allocations et primes aux propriétaires et aux éleveurs. Les premières courses officielles au trot sont apparues en France en 1836 à Cherbourg. Grâce au succès de ces manifestations, les courses au trot se sont multipliées rapidement, notamment en Normandie. Au-delà du divertissement qu'elles offraient, leurs objectifs étaient d'encourager l'amélioration de l'élevage normand, d'améliorer l'éducation des chevaux et de développer les ventes. En 1873, les premières courses au trot de la région parisienne ont lieu et c'est en 1879 que le premier champ de courses pour les trotteurs en région parisienne sera inauguré à Vincennes. Il deviendra l'hippodrome de Vincennes, le Temple du trot mondialement reconnu, avec ses rendez-vous majeurs et ses courses emblématiques telles que le Prix d'Amérique.

La discipline internationale par excellence est le trot attelé où le trotteur tracte un sulky et son driver. La France a développé une discipline spécifique, le trot monté où le trotteur porte un jockey. Les deux types d'épreuves sont intimement liés sur le plan réglementaire et se côtoient sur la quasi-totalité des hippodromes français. Les courses de trot sont des courses de vitesse qui consistent à parcourir entre 1600 et 4200m le plus rapidement possible. Elles ont la particularité de se disputer exclusivement au trot. Les chevaux sont ainsi disqualifiés s'ils passent au galop ou toute autre allure que le trot, avec une tolérance de quelques foulées sur l'ensemble de la course. En effet, les chevaux doivent accomplir leur parcours au trot régulier. Tout cheval qui prend toute autre allure doit être immédiatement remis au trot régulier, sans gêner les autres concurrents sous peine de sanctions. La participation à une course au trot en France nécessite un préalable pour tout compétiteur, appelé la qualification. Celle-ci répond au besoin de s'assurer que chaque trotteur participant à une épreuve possède un niveau suffisant pour courir. La qualification est un test d'aptitude chronométré, disputé sur 2000 m et organisé de manière similaire à une course. Premier contact officiel avec la compétition, la qualification est un moment important pour la suite de la carrière d'un trotteur. Les temps exigés dépendent de l'âge des chevaux. Un trotteur peut se présenter aux épreuves de qualification dès le mois de mai de l'année de ses 2 ans. Le barème des temps se durcit en fonction de l'âge du trotteur. Il n'y a pas d'âge imposé pour satisfaire aux qualifications: certains trotteurs se qualifient à l'âge de 2 ans, d'autres à 3 ou 4 ans, voire exceptionnellement à 5 ans. Les séances de qualifications sont organisées sous l'autorité de la SECF et

ont lieu sur le centre d'entraînement de Grosbois et sur des hippodromes homologués sur l'ensemble du territoire français. Les trotteurs à qualifier doivent se soumettre aux mêmes règles que celles d'une course normale, en particulier en matière de respect des allures, de comportement général et de contrôle anti-dopage. En moyenne 40 % d'une génération passe ce test avec succès, soit près de 5000 poulains et pouliches qualifiés en 2011 (Bilan 2007-2011, SECF). Lorsqu'un trotteur déjà qualifié ne respecte pas certaines conditions (gains insuffisants à un âge donné ou absence prolongée depuis sa dernière course), il doit passer un nouveau test appelé requalification afin de prouver qu'il est toujours compétitif et physiquement apte à courir.

1.1.2 L'effort en course

Il existe quatre types de courses : les courses de série, de Groupe III, de Groupe II et de Groupe I (niveau le plus élevé). Les courses de Groupe sont réservées aux meilleurs trotteurs et sont disputées en France ou à l'étranger, exclusivement sur les hippodromes homologués pour accueillir les courses de ce niveau, répondant aux normes techniques garantissant les résultats enregistrés et disposant en particulier du système agréé pour l'enregistrement des records. La vitesse est exprimée par le temps mis par un cheval pour parcourir une distance déterminée par les conditions d'une course et inscrit au procès-verbal de cette course. Chaque cheval est toujours accompagné de son record exprimé en réduction kilométrique : la vitesse est exprimée par le temps et réduite au kilomètre. Les records actuellement enregistrés lors de course de Groupe I se situent à 1 min 11 s et 9 centièmes en réduction kilométrique (50 km/h). Pour assurer l'égalité des chances dans une course, le Code des courses au trot peut imposer un handicap au cheval qui se traduit souvent par un recul du point de départ ou une avance. Le recul est imposé lorsque le cheval a soit gagné soit couru dans l'année, ou l'avance est accordée pour n'avoir pas gagné ou pour n'avoir pas couru dans l'année, l'année se compte du 1er janvier précédant le jour de la course.

Les conditions des courses sont définies en fonction du sexe (mâle, hongre et femelle), de l'âge et/ou des gains des chevaux. Certaines restrictions sont également précisées par le Code des courses au trot telles que :

- aucun cheval ne court avant le 1er août de l'année de ses 2 ans au trot attelé et avant le 1er novembre au trot monté.
- les distances pour les courses sont fixées en fonction de l'âge : elles sont comprises entre 1400 et 2500 m pour les chevaux de 2 ans, entre 1400 et 2800 m pour les 3 ans et minimum 2000 m pour les 4 ans et plus, sauf dérogations exceptionnelles.

1.1.3 L'effort en situation d'entraînement

Les techniques et méthodes utilisées par les entraîneurs pour préparer leurs chevaux ont été décrites pour la première fois en 1968 dans un ouvrage complet *Care and training of the trotter & pacer* et

plus particulièrement le chapitre sur les pratiques d'entraînement de Dancer, célèbre entraîneur et driver américain (Dancer, 1968). Ce premier ouvrage préconisait des programmes spécifiques d'entraînement pour préparer les chevaux de courses. Depuis les années 1970, les performances en courses au trot ont beaucoup évolué. En effet, les records de vitesse enregistrés au cours des années 1950 étaient de 1 min 22 s et 6 centièmes en réduction kilométrique (43,6 km/h), soit plus de 10 s par rapport aux records actuels. L'amélioration des performances peut principalement s'expliquer par une sélection génétique accrue depuis des générations. En effet, tout cheval Trotteur Français est inscrit dans le Stud-Book du Trotteur Français, qui est assimilé au livre généalogique officiel et comprend le registre des étalons et des juments pouvant produire dans la race, le répertoire des poulains inscrits au titre de l'ascendance et une liste des naisseurs de Trotteur Français. Seuls les chevaux inscrits au Stud-Book du Trotteur Français sont admis à courir dans une course soumise au Code des courses au trot. L'admission à la reproduction des parents repose sur une sélection drastique liée aux performances sportives. Par exemple, les étalons doivent soit avoir été classés dans les trois premiers d'une course de Groupe I, soit avoir réalisé au cours de leur carrière, six fois une performance. L'amélioration des performances en course peut également s'expliquer par de véritables avancées techniques telles que les équipements du cheval (sulky, harnais, ferrure) et la qualité des sols des hippodromes façonnés comme de véritables anneaux de vitesse. De façon surprenante, l'amélioration des performances en courses ne semble que peu liée aux méthodes d'entraînement. En effet, Lovell (1994) précisa, après un travail d'observation sur le terrain, que les méthodes d'entraînement étaient principalement basées sur le jugement subjectif des entraîneurs et sur leur expérience antérieure. La principale limite observée par Lovell repose sur le fait qu'il n'existe aucune règle et aucune mesure exceptée pour la vitesse, et que de fait les méthodes d'entraînement ne sont pas individualisées aux capacités des chevaux. Ainsi l'auteur proposa un programme d'entraînement spécifique aux USA où l'intensité d'effort était exprimée en pourcentage de la vitesse à fréquence cardiaque maximale (Lovell, 1994). Ce programme était décliné en trois phases : adaptation, foncier et vitesse ('racing') (Tableau 3). La phase d'adaptation était caractérisée par quatre semaines de jogging de plus en plus long 5000 à 13000 m au trot à 5 m/s (18 km/h). La phase de foncier comprenait des alternances de joggings de 10000 m au trot à 5 m/s avec des joggings à 90 % de la vitesse à fréquence cardiaque maximale pendant quatre semaines. Enfin la période d'affûtage de deux semaines qui alternait des joggings de 6000 à 10000 m au trot à 5 m/s avec des *heats* plus ou moins longs et à vitesse de plus en plus élevée chaque jour (données non communiquées).

En Europe, les pratiques d'entraînement utilisées chez les chevaux trotteurs ont été peu décrites. En 2006, une étude a été menée par Mos (2006) dans le cadre d'un mémoire ingénieur dans 30 écuries de trot en France. Ce travail a décrit les différents exercices en précisant le nombre moyen de kilomètres parcourus par semaine ainsi que la vitesse moyenne d'exercice (Tableau 4). Il a été rapporté que les entraîneurs utilisaient quatre principaux exercices : le marcheur, la promenade, le footing et les

exercices de vitesse (Tableau 3). Le marcheur consistait à placer les chevaux dans une enceinte dans laquelle ils marchent pendant 45 à 60 minutes et semblait souvent utilisé pour l'échauffement et la récupération lors des exercices de vitesse. La promenade était effectuée au pas et au trot pendant 45 minutes. L'exercice de footing, réalisé deux fois par semaine, consistait à trotter pendant 30 min au petit trot et parcourir en moyenne 10 km. Les trotteurs effectuaient également un travail intensif une ou deux fois par semaine. Dans certaines écuries (7/30), les entraîneurs variaient le contenu de ce type de travail sur une même semaine: travail fractionné ou à « l'américaine » (*i.e.* travail continu). Le travail fractionné pouvait être constitué de 4 à 6 répétitions de 1000 mètres à des vitesses élevées (13,5 m/s en moyenne). L'américaine se rapproche d'un travail continu où les trotteurs parcouraient 3000 à 6000 m en deux fois à une vitesse d'environ 10 m/s. Avant ce travail spécifique, les chevaux marchaient et trottaient au petit trot sur une distance moyenne de 3650 ± 750 m. La récupération était conduite au petit trot (4,2 ± 0,7 m/s) pendant 10 à 15 minutes.

Une récente étude en Allemagne a étudié les exercices d'entraînement d'un entraîneur professionnel de trotteurs (Wegener *et al.*, 2012) en précisant la charge de travail en fonction de l'âge des chevaux. Trois principaux exercices sont utilisés pour entraîner les chevaux de 2, 3 et 4 ans : un exercice qualifié de 'speed exercise', composé de deux phases de sprint séparées par 60 min de repos au box, un exercice 'tempo' qui consiste en une session au trot à vitesse modérée avec une phase de sprint et enfin un 'jogging' exercice sans phase de vitesse. Les auteurs ont précisé que le tempo exercice était exclusivement utilisé pour entraîner les jeunes chevaux de 2 ans (Tableau 3).

L'ensemble de ces données complètent la littérature sur les pratiques d'entraînement. Néanmoins, les pratiques d'entraînement nécessitent d'être investiguées plus en détail afin de décrire le type, l'intensité, le volume et la fréquence hebdomadaire pour chaque exercice et pour chaque phase d'exercice. Il semble également nécessaire d'investiguer la charge d'entraînement en fonction du niveau d'entraînement des chevaux. Néanmoins, comme nous venons de le voir, il semblerait que les pratiques d'entraînement reposent sur le jugement subjectif des entraîneurs et sur leur expérience, où aucune mesure ne permette de rationaliser les pratiques d'entraînement. Pourtant, l'étude de la dépense énergétique induite par un exercice nécessite d'être appréhendée selon les besoins spécifiques et les capacités de chaque individu. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle, chez l'homme, l'intensité d'exercice est couramment exprimée en % de VO_{2max}, % de FC_{max} ou encore en % de la vitesse maximale d'un sujet.

Tableau 3. Sélection de données issues des études descriptives sur les pratiques d'entraînement des chevaux trotteurs.

	Lovell, 1994			**Mos, 2006**						**Wegener *et al.*, 2012**							
Phase de travail	Adaptation	Foncier	Affûtage														
Type d'exercice	Jogging	Alternance de joggings	Alternance de joggings avec des heats variant	Marcheur	Promenade	Footing	Travail de vitesse : -fractionné -à l'américaine			‘Speed exercise’			‘Tempo’			‘Jogging’	
Phase d'exercice	/	/	/	/	/	/	Ech.	Ex.	Recup.	Ech.	Ex.	Recup.	Ech.	Ex.	Recup.	Pas	Trot
Vitesse (m/s)	/	5 – vitesse à 90 % de FC_{max}	/	pas	pas et petit trot	petit trot	petit trot	-13,5 -10	4,2	1^{er} : 6,4 2^{eme} :6,6	1^{er} : 9,9 2^{eme} :11,3	1^{er} : 5,3 2^{eme} : 5,3	6,2	10,2	5,3	1,6-1,8	5,6 - 5,7
Durée (min)	/	/	/	45-60	45	30	/	/	10-15	/	/	/	/	/	/	/	/
Distance (m)	5000 - 13000	1000	6000 – 10000	/	/	10000	3650	-1000 -3000 -6000	/	1^{er} : 3332 2^{eme} : 1794	1^{er} : 2143 2^{eme} : 1980	1^{er} : 1582 2^{eme} : 2289	32 48	2176	1835	200 - 500	300 - 1400
Fréquence hebdomadaire (nombre de séance/semaine)	/	/	/	2	1	2	2			/	/	/	/	/	/	/	/
Durée phase (semaine)	4	4	2	/	/	/	/			/	/	/	/	/	/	/	/

/ : donnée non communiquée ; heat : phase d'exercice d'intensité élevée (intensité non communiquée) ; Ech. : phase d'échauffement ; Ex. : phase d'exercice ; Recup. : phase de récupération ; FC_{max} : fréquence cardiaque maximale.

Tableau 4. Caractéristiques descriptives des entraînements des trotteurs (d'après Mos, 2006).

Résultats cumulés pour une semaine d'entrainement-type	**Trot (N=217)**
Nombre de sorties (min – max)	5,8 ± 0,8 (3 – 7)
Durée totale des sorties en minutes (min –max) et en heures (min – max)	 254 ± 157 (56 - 879) 4,1 ± 2,5 (0,9 - 14,6)
Composition moyenne de la semaine d'entrainement (en % du temps d'exercice) :	
Pas (min - max)	53,3 ± 22,9 % (15,4 - 85,7)
Trot (min - max)	37,1 ± 21,9 % (4,3 - 79,2)
Grand trot (min - max)	9,6 ± 10,1 % (1,4 - 60,2)
Nombre de kms parcourus (min - max)	55 ± 22 (23 – 132)
Moins de 50 km /semaine	49,7 %
Entre 50 et 60 km /semaine	34,2 %
Plus de 60 km /semaine	22,1 %
Vitesse moyenne de l'allure de travail m/s (min - max) km/h (min - max)	 11,5 ± 1,6 (8,9 – 15,3) 41,5 ± 5,6 (32,2 - 55,2)
Moins de 40 km/h	42,8 %
Entre 40 et 50 km/h	47,9 %
Plus de 50 km/h	9,3 %

1.2 Le métabolisme énergétique et l'exercice chez le cheval trotteur

A l'effort, les muscles actifs consomment davantage d'oxygène et de substrats énergétiques. L'énergie fournie sous forme d'ATP par les diverses voies métaboliques provient des mécanismes anaérobies et aérobie : deux systèmes fonctionnent sans apport d'oxygène, le système ATP-PCr et la glycolyse anaérobie, alors que la lipolyse et la glycolyse aérobies utilisent l'oxygène (Tableau 5). Les caractéristiques de l'effort *i.e.* les caractéristiques spécifiques de l'activité pratiquée, la durée, la fréquence et l'intensité, vont alors conditionner les adaptations énergétiques et la contribution des différentes voies métaboliques autant chez l'homme (Pradet, 1989) que chez le cheval (Couroucé, 1993) (Figure 1).

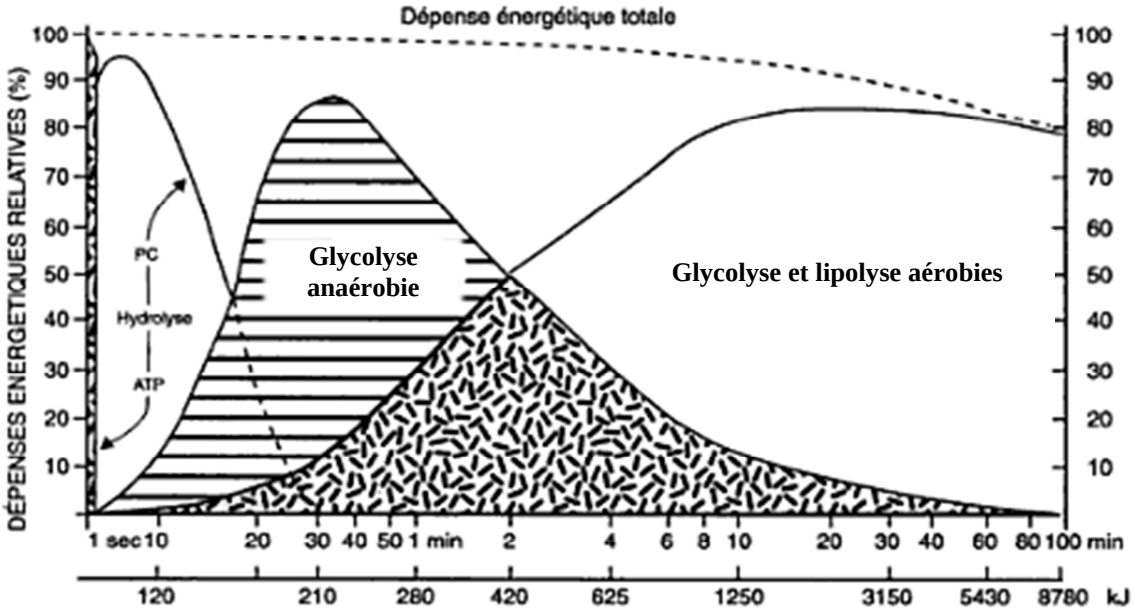

Figure 1. Contribution des diverses voies métaboliques en fonction du temps d'effort (d'après Poortmans, 1988 modifié).

1.2.1 La sollicitation des métabolismes énergétiques lors d'un effort

Toute contraction musculaire ne peut débuter que par l'utilisation des réserves énergétiques stockées sous forme d'ATP (Adénosine Tri Phosphate) et de phosphocréatine (PCr). Ces réserves sont disponibles en très faible quantité et permettent uniquement quelques dizaines de secondes de travail musculaire. Pour assurer des exercices prolongés, il faut donc maintenir le renouvellement de l'ATP musculaire. Les stocks énergétiques issus de l'oxydation des nutriments représentent le carburant essentiel régénérant l'ATP.

Tableau 5. Source de production énergétique et leurs caractéristiques (d'après Pradet, 1989 ; Couroucé, 1993).

	Homme			Cheval		
Métabolismes **Caractéristiques**	**Système ATP-PCr**	**Glycolyse anaérobie**	**Système aérobie**	**Système ATP-PCr**	**Glycolyse anaérobie**	**Système aérobie**
Substrats utilisés	ATP + PCr	Glycogène Glucose	Glucides, lipides	ATP + PCr	Glycogène Glucose	Glucides, lipides
Délai d'intervention prépondérante	Nul	20 à 30 s	1 à 3 min	Nul	20 à 30 s	2 à 4 min
Puissance ou débit maximal d'énergie	Très élevée	Elevée	Modérée à élevée Dépend de VO_{2max}	Très élevée*	Elevée	Dépend de VO_{2max}*
Durée limite du maintien de la puissance	2 à 3 s	25 à 40 s	3 à 15 min	7 à 10 s*	30 à 50 s*	3 à 15 min*
Capacité ou quantité totale d'énergie disponible	Très faible	Faible	Très élevée	Très faible	Faible	Très élevée Dépend du % de VO_{2max} utilisé*
Durée limite du maintien de la capacité	7 à 20 s	2 min	Théoriquement illimitée Dépend du % de VO_{2max} utilisé*	20 à 30 s	20 s à 2 min	Théoriquement illimitée Dépend du % de VO_{2max} utilisé*
Lieu de production dans la cellule	Cytoplasme (niveau filament actine et myosine)	Cytoplasme cellulaire (extra mitochondrial)	Mitochondrie	Cytoplasme (niveau filament actine et myosine)	Cytoplasme cellulaire (extra-mitochondrial)	Mitochondrie
Produit final du catabolisme	ADP et créatine	Acide lactique	$H_20 + CO_2$	ADP, AMP et Créatinine	Acide lactique	$H_20 + CO_2$
Facteurs limitants	Epuisement des réserves	Baisse du pH cellulaire	VO_{2max}, épuisement du glycogène, thermolyse	Epuisement des réserves	Accumulation d'acide lactique et baisse du pH cellulaire	VO_{2max}, épuisement du glycogène, thermolyse
Durée de la récupération après sollicitation maximale	Reconstitution des réserves ATP – PCr 2 min	Métabolisme des lactates 1 h 30 min	Reconstitution du glycogène de 24 à 72 h	Reconstitution des réserves ATP - PCr 2 min	Métabolisme des lactates 1 h	Reconstitution du glycogène 24 h

* : Dépend des caractéristiques individuelles et du niveau d'entraînement.

Le système ATP-PCr

Le système ATP-PCr est le système énergétique le plus simple. Outre l'ATP, il existe dans les cellules une autre molécule possédant une liaison phosphate à haute énergie *i.e.* la phosphocréatine (PCr). L'énergie libérée par la rupture de la liaison phosphate n'est pas directement utilisée pour accomplir un travail cellulaire mais pour reconstituer les stocks d'ATP. La libération de l'énergie à partir de la PCr est facilitée par une enzyme, la créatine kinase (CK) qui agit sur la PCr pour séparer le phosphate inorganique (Pi) de la créatine. L'énergie libérée peut alors servir à relier Pi à la molécule d'ADP pour former l'ATP. Ce système constitue le moyen le plus simple pour les cellules d'éviter la déplétion en ATP. Les réserves musculaires en ATP, cinq fois plus importantes chez le cheval que chez l'homme sont relativement limitées (± 20 - 25 mmol/kg de muscle frais chez le cheval (Harris *et al.*, 1997 ; McCutcheon *et al.*, 1999) *vs.* ± 5 mmol/kg de muscle frais chez l'homme (Poortmans et Boisseau, 2012). L'enjeu est alors de fournir de l'ATP au fur et à mesure de l'effort pour qu'une réserve soit continuellement disponible. Ainsi pendant l'effort l'ATP est dégradé au cours de la contraction musculaire, il est synthétisé en permanence à partir de la PCr et sous l'action de la créatine kinase. L'énergie disponible peut s'avérer complètement épuisée au cours d'un effort intense et bref de 10 secondes (tel un sprint de 100 mètres chez un athlète humain de haut niveau), bien que la pratique d'un exercice musculaire sous maximal épargne les stocks rendant possible leur utilisation à la fin d'une course. Néanmoins, la capacité de l'organisme à maintenir un niveau suffisant d'ATP est limitée. Si les stocks d'ATP et de PCr contribuent, pour l'essentiel, à la fourniture énergétique pendant les 3 à 15 premières secondes de l'exercice, au-delà, les muscles doivent fonctionner grâce à d'autres processus de formation de l'ATP : la glycolyse et la combustion oxydative des nutriments.

Le système glycolytique

Cette autre manière de produire de l'ATP réside dans la libération d'énergie à partir de la dégradation du glucose autant chez l'homme que chez le cheval. Le glucose représente près de 99 % du sucre circulant dans le sang. Le glucose sanguin provient de la digestion des glucides et de la dégradation du glycogène hépatique. Le glycogène est synthétisé à partir du glucose, et est stocké dans le foie et les muscles avant utilisation. Pour que le glucose puisse fournir de l'énergie, il doit être transformé en un composé appelé glucose-6-phosphate (G6P) C'est une succession de réactions complexes qui assure la dégradation du glycogène en acide lactique, produit terminal, assurant la production d'énergie (Figure 2). La glycolyse produit de l'acide pyruvique qui, en absence d'oxygène, est transformé en acide lactique. Les différentes étapes qui constituent la glycolyse ne nécessitent pas d'oxygène. Par contre la destinée de l'acide pyruvique, formé par la glycolyse, est conditionnée par l'utilisation ou non d'oxygène. Lorsqu'on parle de système glycolytique, on considère que l'oxygène n'intervient pas, on parle alors de glycolyse anaérobie. Dans ce cas, l'acide pyruvique est transformé en acide lactique ($C_3H_6O_3$). Cet acide lactique se dissocie rapidement de son proton H^+ et se lie avec des ions sodium

(Na^+) ou potassium (K^+) pour former le lactate. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle ces deux composés distincts sont souvent confondus. Le facteur limitant la poursuite d'un exercice maximal dans le domaine du métabolisme anaérobie lactique n'est pas l'épuisement du glycogène mais l'accumulation d'acide lactique dans les muscles et les compartiments liquidiens. L'accumulation d'acide lactique augmente rapidement l'acidose musculaire qui altère le fonctionnement des voies métaboliques (Bigard et Guezennec, 1993) et se traduit physiquement par une tétanie des muscles sollicités.

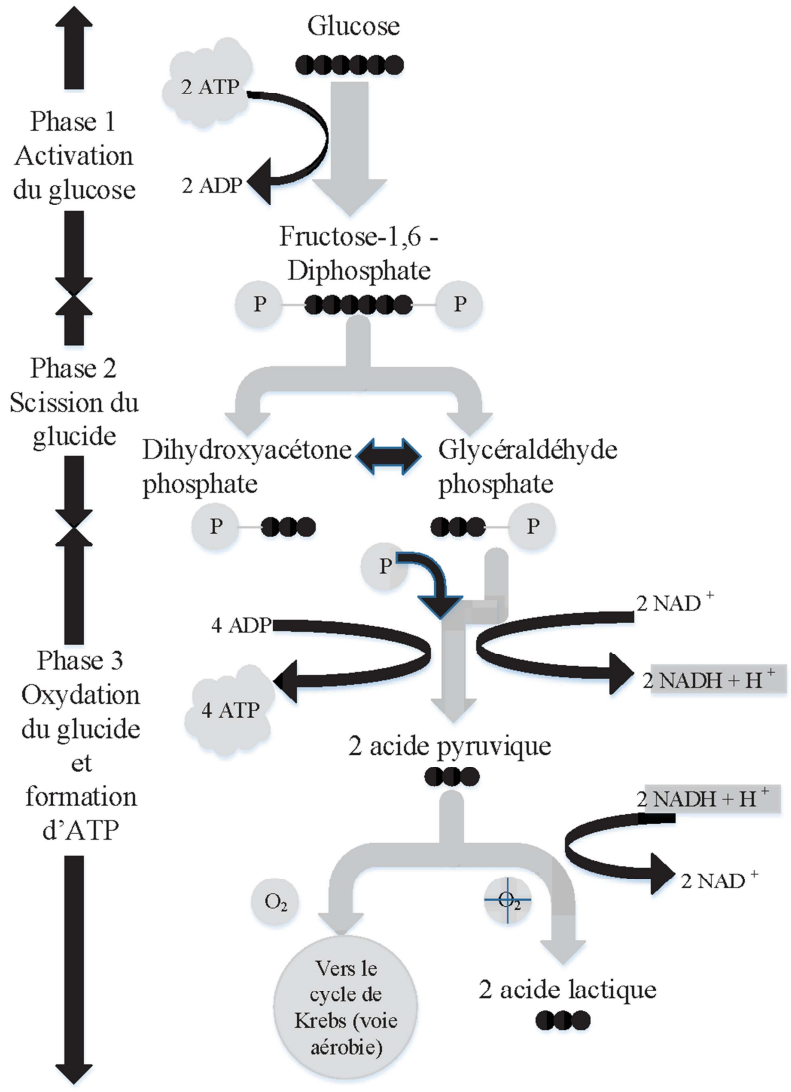

Figure 2. Production d'énergie (ATP) par la glycolyse : transformation du glucose et glycogène en acide pyruvique puis acide lactique.

Le système oxydatif

Encore appelée respiration cellulaire, la production oxydative de l'ATP se produit à l'intérieur d'organites cellulaires : les mitochondries. Le système oxydatif correspond à la dégradation des

substrats énergétiques (glucides, lipides, protéines) en présence d'oxygène. Dès lors que les exercices durent plus de 2 min, le système oxydatif intervient alors de manière préférentielle dans la fourniture d'énergie autant chez l'homme que chez le cheval (Tableau 5). Contrairement aux deux précédents systèmes, le rendement énergétique du système oxydatif est très important. Le métabolisme aérobie constitue alors la source essentielle d'énergie lors d'exercices allant de quelques minutes à des efforts d'endurance de plusieurs heures.

L'oxydation des glucides

La production oxydative complexe de l'ATP implique trois processus : la glycolyse, le cycle de Krebs et la chaîne de transport des électrons (Figure 3).

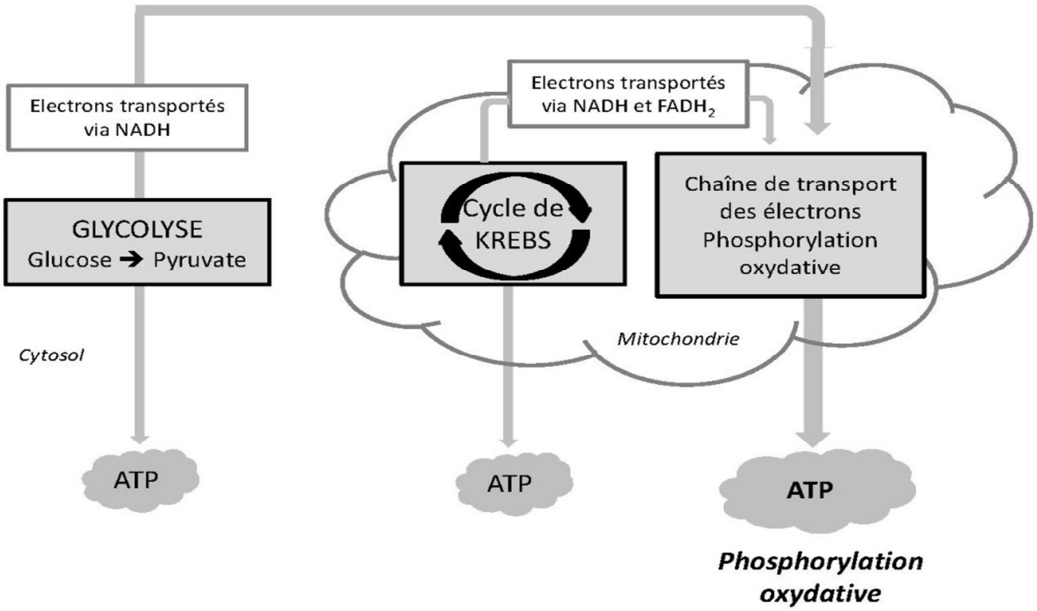

Figure 3. Production oxydative de l'ATP.

- *La glycolyse*

La glycolyse, qui joue à la fois un rôle dans la production aérobie et anaérobie de l'ATP, est identique que l'oxygène soit présent ou non. La présence d'oxygène détermine seulement le devenir du produit final : l'acide pyruvique qui est converti en acétyl-coenzyme A en présence d'oxygène.

- *Le cycle de Krebs*

Une fois formé, l'acétyl-coenzyme A entre dans le cycle de Krebs, une série complexe de réactions chimiques qui permet l'oxydation complète de l'acétyl-coenzyme A. A la sortie, environ 38 molécules d'ATP sont formées et le glucide a été dégradé en hydrogène et en CO_2 (Figure 4).

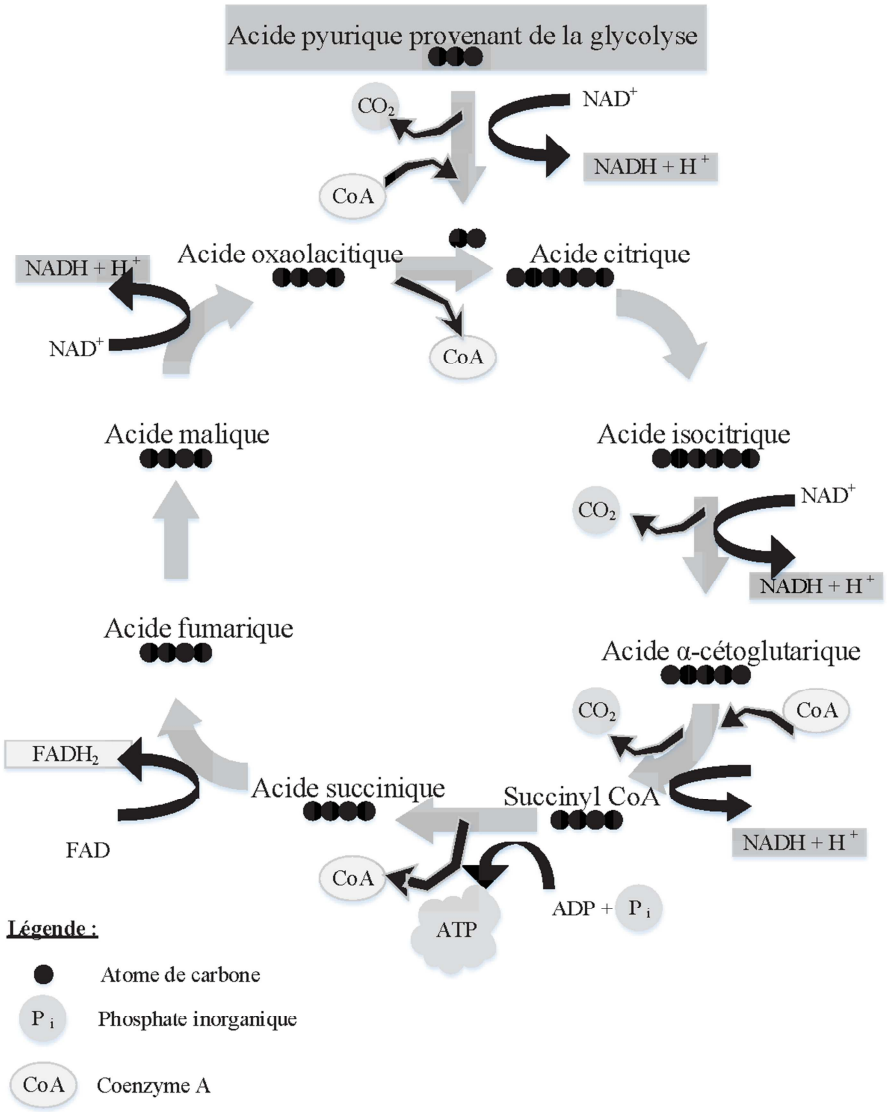

Figure 4. Cycle de l'acide citrique (cycle de Krebs).

- *La chaîne de transport des électrons*

Lors de la glycolyse, l'hydrogène (H^+) est libéré au fur et à mesure que le glucose est métabolisé en acide pyruvique. La quantité d'hydrogène libérée par le cycle de Krebs est encore plus importante. Si les ions hydrogènes s'accumulaient, le milieu intracellulaire deviendrait trop acide. La chaîne de transport des électrons a ainsi pour but de les éliminer en les liant à des coenzymes. Le cycle de Krebs est alors couplé à une série de réactions connues sous le nom de chaîne de transport des électrons. Les ions hydrogènes, libérés pendant la glycolyse et le cycle de Krebs, se combinent à deux coenzymes : le NAD (nicotinamide adénine dinucléotide) et le FAD (flavine adénine dinucléotide). Celles-ci transportent les ions hydrogènes vers la chaîne de transport des électrons où ils sont divisés en protons

et électrons. A la fin de la chaîne, les H^+ se combinent à l'oxygène pour former l'eau, prévenant ainsi l'acidification du milieu.

L'oxydation des lipides

L'oxydation des lipides débute par la béta-oxydation des acides gras libres non estérifiés (AGNE). Les étapes suivantes sont les mêmes que pour les glucides : le cycle de Krebs et la chaîne de transport des électrons (Figure 5). L'énergie apportée par l'oxydation des lipides est beaucoup plus importante que celle provenant de l'oxydation des glucides. Elle varie selon le type d'acide gras utilisé. Cependant, lors d'exercices intenses, la vitesse maximale de régénération de l'ATP est plus faible que son utilisation et l'énergie libérée par molécule d'oxygène consommée est largement plus faible pour les lipides que pour les glucides.

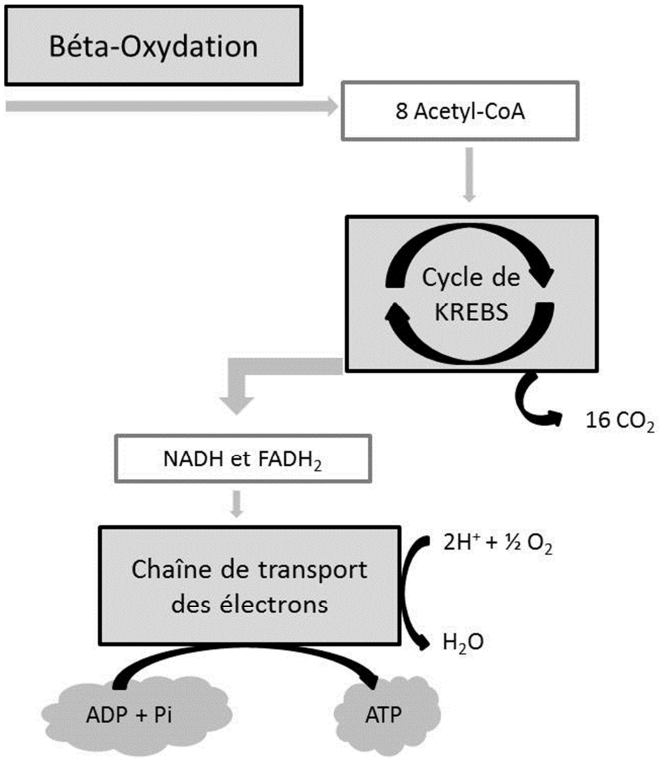

Figure 5. Oxydation totale des acides gras non estérifiés.

L'oxydation des protéines

L'oxydation des protéines est plus complexe parce que ces molécules, constituées d'acides aminés, contiennent de l'azote qui ne peut être oxydé. Contrairement aux glucides et lipides, les protéines ne constituent pas un réservoir important aisément utilisable pour satisfaire les besoins énergétiques d'un sujet en bonne santé (Poortmans et Boisseau, 2012). Ainsi, leur métabolisme est souvent négligé.

Les trois systèmes producteurs d'énergie ne fonctionnent pas de façon indépendante les uns des autres. En effet, que ce soit lors d'un effort de sprint ou d'une épreuve d'endurance, les trois systèmes interviennent ensemble mais dans des proportions différentes. A l'exception des périodes de transition d'un métabolisme à l'autre, il y a toujours prédominance d'une voie énergétique sur les deux autres.

1.2.2 Les métabolismes énergétiques en course au trot

La gestion de l'effort d'une course chez l'athlète humain et équin, communément appelée plan de course, induit de très fortes variations dans les sollicitations énergétiques. Les courses et notamment les courses au trot sont généralement conduites en deux phases : une première phase courue à vitesse modérément élevée pendant laquelle le système oxydatif assure majoritairement la production d'énergie ; et une seconde phase progressivement accélérée jusqu'à l'obtention de la vitesse maximale du moment. Cette dernière constitue le plus souvent le sprint final où les systèmes anaérobies sont particulièrement sollicités. Ce découpage de l'effort induit alors l'intervention des différents métabolismes énergétiques, qui assure de manière complémentaire une réponse adéquate aux besoins métaboliques croissants.

Au cours d'une course au trot la mobilisation du système aérobie s'avère être dominante bien que l'intervention des métabolismes anaérobies soit inévitable. L'effort du cheval de course trotteur est parfois qualifié de « mixte » (Figure 6) (Art *et al.*, 2000), faisant appel à une contribution quasi égale aux métabolismes aérobie et anaérobie (Dahl, 2005). Lorsque les courses se déroulent sur des distances supérieures à 1600 m, le métabolisme aérobie devient dominant (McMicken, 1983 ; Bayly, 1985). Ainsi, le potentiel métabolique aérobie a une importance croissante au fur et à mesure que la distance de course augmente. Le pourcentage d'ATP provenant de la filière aérobie lors d'une course de 2400 m est estimé entre 55 % (Barrey 1990) et 90 % (Eaton, 1994). Cela permet d'ailleurs d'établir des analogies entre l'effort physique du trotteur et celui de l'athlète humain de demi-fond (course de 1500 m courue en 3 min 30 s) (Dahl, 2005) où le pourcentage d'ATP provenant de la filière aérobie est compris entre 60 et 80 %.

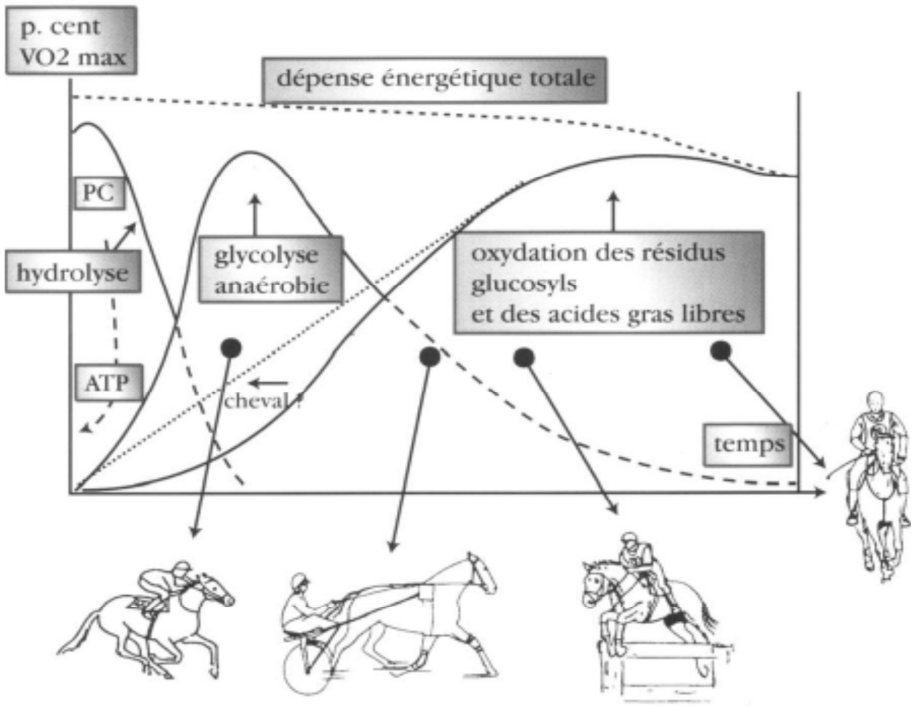

Figure 6. Filières énergétiques contribuant à la synthèse de l'ATP au cours de l'effort. Leur contribution respective est fonction de la durée (temps) et de l'intensité de l'effort (d'après Art *et al.*, 2000).

La performance en course est directement liée aux stocks énergétiques et à l'état de ces stocks en début d'épreuve. Ainsi, pour retarder l'apparition de fatigue en course, la vitesse de course doit être maîtrisée de telle sorte que les stocks d'ATP et de PCr ne soient pas prématurément épuisés. Ce phénomène est couramment observé chez les chevaux de course : les chevaux « s'arrêtent » ou « calent » avant la fin de la course. L'épuisement précoce des stocks d'ATP et de PCr peut ainsi conduite à une fatigue précoce et à une impossibilité de maintenir l'allure de course jusqu'à la fin. La vitesse idéale permettant de maintenir un taux optimal d'utilisation de l'ATP et de la PCr pendant une course est primordiale, puisqu'elle conditionne le sprint final. De plus, il a été précédemment démontré que l'épuisement des réserves glycogéniques chez l'homme était un facteur limitant de la performance anaérobie (Guezennec *et al.*, 1988), phénomène également observé chez le cheval. En effet, alors qu'une diminution de 22 % des stocks de glycogène musculaire n'a pas d'effet mesurable sur la durée d'un effort d'intensité élevée (Davie *et al.*, 1996), une diminution de 55 % des stocks de glycogène musculaire semble altérer la performance anaérobie (Lacombe *et al.*, 1999).

1.2.3 Les métabolismes énergétiques en situation d'entraînement de trot

Comme vu précédemment, les situations d'entraînement des chevaux trotteurs semblent alterner des exercices à faible intensité relativement longs (jusqu'à 60 min) et des exercices brefs et intenses.

Néanmoins, les données actuelles sur les caractéristiques précises des exercices d'entraînement (intensité, volume et fréquence) étant relativement limitées, la contribution des métabolismes énergétiques dans la fourniture d'énergie en situations d'entraînement n'a, à notre connaissance, jamais été investiguée.

La dépense énergétique d'activité nécessite d'être appréhendée discipline par discipline, puisque chacune d'elle possède ses propres spécificités. Au sein d'une même discipline, la dépense énergétique d'un exercice est intimement liée à son intensité, son volume et sa fréquence, pour lesquels les différences interindividuelles peuvent varier dans de larges proportions malgré les mêmes caractéristiques d'exercices.

Chez le cheval trotteur, l'effort en course au trot mobiliserait les différents systèmes énergétiques, dont la contribution serait directement liée aux caractéristiques des courses. Les données actuelles semblent indiquer que le pourcentage d'ATP provenant de la filière aérobie varie entre 55 et 90 % lors d'une course au trot. Concernant les pratiques d'entraînement, aucune donnée n'est actuellement disponible permettant d'estimer la contribution des voies métaboliques dans la fourniture des efforts d'entraînement. Ainsi les pratiques d'entraînement nécessitent d'être complétées et clairement définies afin de pouvoir quantifier la dépense énergétique induite par chaque exercice spécifique à la discipline en question.

PARTIE 2

Les marqueurs physiologiques de la dépense énergétique liée à l'exercice chez le cheval trotteur

L'exercice est une situation dynamique nécessitant une adaptation permanente et intégrée des grands systèmes de l'organisme *i.e.* respiratoire, cardiaque et périphériques, pour permettre un fonctionnement cellulaire optimum. Les systèmes nerveux et hormonal concourent à contrôler ces adaptations pour satisfaire les besoins métaboliques en oxygène et fournir les substrats énergétiques nécessaires à la réalisation de l'effort. L'étude des réponses adaptatives mises en place par l'organisme au cours de l'exercice permet de suivre l'évolution des paramètres physiologiques en fonction de l'effort et de cibler les marqueurs pouvant être utilisés de manière préférentielle chez des chevaux afin d'estimer la dépense énergétique liée à l'exercice. Ce chapitre s'attache donc à présenter les marqueurs physiologiques susceptibles d'être utilisés pour quantifier la dépense énergétique chez le cheval à l'exercice et aussi de décrire leur évolution à l'effort.

2.1 La fréquence cardiaque

La mesure de la fréquence cardiaque est couramment utilisée comme une méthode d'estimation de la dépense énergétique d'exercice chez l'homme (Ceesay *et al.*, 1989 ; Crouter *et al.*, 2004 ; Erdogan *et al.*, 2010) et dans une moindre mesure chez le cheval (Matsui *et al.*, 2004). De nombreux facteurs peuvent agir sur la fréquence cardiaque puisqu'elle est sous l'influence des systèmes nerveux (parasympathique et sympathique) et endocrinien (Yamamoto *et al.*, 1991 ; Von Borell *et al.*, 2007). Néanmoins, elle reflète le travail qui doit être fourni par le cœur pour répondre à l'augmentation des besoins imposés par l'exercice, comme l'indique la comparaison des fréquences cardiaques de repos et d'exercice.

Au repos, la fréquence cardiaque est d'environ 60-80 battements par minute (bpm) chez l'homme (Wilmore *et al.*, 2009) pour une FC de repos de 30-35 bpm chez le cheval (Scheffer *et al.*, 1995). La FC de repos diminue avec l'âge et peut varier avec les conditions environnementales *i.e.* elle augmente avec la température ambiante (Hargreaves *et al.*, 1999) et avec l'altitude (Grover *et al.*, 1986), ce qui, à notre connaissance, n'a jamais été démontré chez le cheval. Pour déterminer le plus précisément possible la FC de repos, il convient donc de la mesurer dans des conditions de relaxation totale, c'est-à-dire le matin au réveil chez l'homme et le matin dans le box chez le cheval.

A l'exercice, la FC augmente rapidement au prorata de l'intensité d'exercice, sauf à proximité du maximum autant chez l'homme (Wilmore *et al.*, 2009) que chez le cheval (Lindhom et Saltin, 1974). De multiples facteurs peuvent influencer l'évolution de la FC en fonction de la charge de travail. Parmi eux figurent les facteurs extrinsèques (conditions environnementales, qualités et profondeurs des sols,…), le statut d'entraînement (Foreman *et al.*, 1990) ou encore la pathologie (Erickson *et al.*, 1987).

A l'approche du maximum, l'augmentation de la FC diminue, puis s'annule. La fréquence cardiaque maximale (FC_{max}) est alors atteinte. Elle permet de matérialiser la limite supérieure de la performance de la pompe cardiaque. Il a précédemment été relevé des FC_{max} de 230-240 bpm (Hinchcliff et Geor,

2008) chez des galopeurs, et une FC_{max} moyenne de 235 bpm chez des chevaux trotteurs (d'après une compilation de références bibliographiques (Lindhom et Saltin, 1974 ; Gauvreau *et al.*, 1995 ; Betros *et al.*, 2002 ; Van Erck *et al.*, 2007), indiquant la remarquable efficacité cardiaque des chevaux de course. Cette valeur maximale est relativement stable au fil des jours, bien qu'elle soit sujette à détérioration avec l'âge. En effet, l'âge entraîne une difficulté de l'organisme à réguler le flux sanguin, à maintenir l'homéostasie des fluides ou encore à maintenir un système thermorégulateur efficace durant l'effort (McKeever *et al.*, 2010). Chez l'homme, il est possible de l'estimer à partir de l'âge car la FC_{max} diminue d'environ un battement par année. Pour un âge donné, elle s'évalue grâce à la traditionnelle équation 220-âge exprimée en année (Fox *et al.*, 1971). Cette équation a fait l'objet de nombreuses discussions, puisqu'il s'agit d'une approximation autour de laquelle les valeurs réelles individuelles peuvent varier dans de larges proportions (Whaley *et al.*, 1992 ; Robergs et Landwehr, 2002 ; Verschuren *et al.*, 2011). D'autres équations ont ainsi vu le jour permettant d'estimer, toujours en fonction de l'âge, la limite maximale de la pompe cardiaque. Par exemple, une méta-analyse de 351 études et 18712 sujets propose une nouvelle équation pour des sujets adultes et sains : FC_{max} = 208 – (0,7 x âge) (Tanaka *et al.*, 2001).

Bien que les effets de l'âge sur la pompe cardiaque pourraient avoir les mêmes répercussions chez le cheval, aucune équation n'a, à ce jour, été validée pour estimer la FC_{max} des chevaux. A notre connaissance, seule l'étude de Betros *et al.* (2002) a apporté des précisions sur les effets délétères de l'âge sur les capacités maximales cardiaques. Dans cette étude, une diminution significative de la FC_{max} a été observée en comparant un groupe de chevaux âgés (27,0 ± 0,2 ans ; 193 ± 3 bpm) à un groupe de jeunes chevaux (6,8 ± 0,4 ans ; 218 ± 2 bpm) et à un groupe de chevaux d'âge moyen (15,2 ± 0,4 ans ; 213 ± 3). Malgré ces précisions, les effets de l'âge sur la fonction cardiaque restent, encore à ce jour, mal connus chez les chevaux. Pourtant, la FC est l'un des seuls paramètres physiologiques facilement mesurables et de nombreuses études équines ont alors démontré la pertinence de son utilisation comme outil d'aide à l'estimation de la dépense énergétique d'exercice (Matsui *et al.*, 2004) mais également dans l'entraînement (Couroucé *et al.*, 2002), l'évaluation de la condition physique (Art *et al.*, 2000) ou encore dans la mesure de la capacité aérobie des chevaux (Persson, 1983).

2.2 Les échanges respiratoires

L'évaluation de la dépense énergétique au moyen de mesures respiratoires, appelée calorimétrie indirecte, est fondée sur la relation existant entre la consommation d'oxygène et le coût énergétique de l'oxydation des substrats (Jequier et Felber, 1987). Afin que la consommation d'oxygène (VO_2) reflète précisément le métabolisme énergétique, il faut que la production d'énergie soit complètement oxydative. En effet, si une quantité d'énergie est apportée par les voies anaérobies, la mesure des échanges gazeux ne reflètera pas l'ensemble du métabolisme. C'est pourquoi cette méthode est

principalement utilisée lors d'effort en état stable durant plus de 60 s, ce qui est le cas de la plupart des activités.

La consommation d'oxygène *i.e.* volume d'O_2 inspiré en une minute moins le volume d'O_2 expiré sur cette même période et le VCO_2 *i.e.* volume de CO_2 expiré en une minute moins le volume de CO_2 inspiré sur cette même période, sont couramment exprimés en valeur absolue (l/min) ou en valeur relative à la masse corporelle (ml/min/kg). Les échanges gazeux respiratoires sont déterminés par la mesure des volumes d'O_2 et de CO_2 qui entrent et qui sortent des poumons pendant une période donnée. Comme l'O_2 quitte les alvéoles après l'inspiration et que le CO_2 arrive, le pourcentage en O_2 dans l'air expiré est plus faible que dans l'air inspiré. Par conséquent, la différence de teneur en gaz entre l'air inspiré et expiré indique le niveau d'O_2 prélevé. Les stocks d'O_2 dans l'organisme étant très limités, l'O_2 prélevé au niveau pulmonaire reflète assez précisément son utilisation par les muscles.

2.2.1 La consommation d'oxygène

Au repos VO_2 est d'environ 0,25 - 0,30 l/min chez l'homme et d'environ 1,5 à 2,5 l/min chez le cheval (de masse corporelle 80 et 500 kg respectivement) (Nery *et al.*, 1982 ; Hanak *et al.*, 2001). Au cours d'un exercice d'intensité progressive, VO_2 augmente de manière linéaire avec l'intensité de l'exercice (Wilmore *et al.*, 2009). Néanmoins, au cours d'exercices prolongés, sous maximaux et d'intensité constante, une augmentation lente de VO_2 a été observé avec le temps, appelée la dérive de VO_2 (Westerlind *et al.*, 1992). Bien qu'incomplètement expliquée, cette dérive serait probablement due à une élévation de la ventilation et des taux circulants de catécholamines avec la durée de l'exercice.

A l'approche des intensités maximales d'effort, la VO_2 atteint son maximum et reste constante même si l'intensité d'exercice continue d'augmenter. Cette valeur maximale est appelée consommation maximale d'oxygène *i.e.* VO_{2max}. VO_{2max} est considérée comme un paramètre fondamental pour évaluer les capacités d'un athlète, puisqu'elle reflète l'aptitude cardiorespiratoire (Saltin et Astrand, 1967 ; Gaskill *et al.*, 2001 ; Astorino *et al.*, 2004). En outre, ces données présentent un intérêt particulier pour objectiver, rationaliser et optimiser les stratégies d'entraînement, en exprimant les intensités d'exercice en pourcentage de VO_{2max} pour chaque individu (% VO_{2max}). Chez le cheval, la mesure de VO_{2max} est également reconnue comme indispensable pour évaluer les capacités aérobies (Evans, 2008) mais reste à ce jour principalement mesurée en conditions expérimentales.

Les valeurs de VO_{2max} varient grandement en fonction du niveau d'entraînement et du sexe des sujets. Des valeurs de consommations maximales d'oxygène de 80-84 ml/min/kg ont été mesurées chez l'élite masculine des sports d'endurance et des skieurs de fond. La valeur la plus élevée jusqu'alors mesurée est celle d'un skieur de fond norvégien, champion du monde, dont le VO_{2max} était de 94 ml/min/kg. Chez les femmes, la valeur la plus élevée enregistrée est de 77 ml/min/kg chez une skieuse de ski de fond russe (Wilmore *et al.*, 2009). A l'opposé, des adultes en très mauvaise condition physique peuvent avoir des VO_{2max} aux environs de 20 ml/min/kg. Chez les chevaux, le niveau de

condition physique semble également influencer la valeur de $VO_{2max,}$ tout comme l'allure de course et la race des chevaux (Pösö *et al.*, 2008). A notre connaissance, aucune différence de VO_{2max} entre les sexes n'a été rapportée chez les chevaux. D'après la bibliographie existante, des valeurs allant de 140 ml/min/kg pour des chevaux trotteurs de niveaux différents (Van Erck *et al.*, 2007) à 165 ml/min/kg pour des trotteurs performants ont été rapportées (Gauvreau *et al.*, 1995). Chez les chevaux galopeurs, les valeurs répertoriées sont de l'ordre de 130-150 ml/min/kg (Rose *et al.*, 1988 ; Tyler *et al.*, 1996) pouvant atteindre 170-200 ml/min/kg (Eaton *et al.*, 1995 ; Hinchcliff et Geor, 2008), voire même 240 ml/min/kg pour le célèbre cheval Secretariat (Haun, 1997). A l'inverse, des chevaux non entraînés âgés de 23 à 30 ans auraient des valeurs de VO_{2max} de 80 ml/min/kg (Kim *et al.*, 2005).

2.2.2 Le dioxyde de carbone rejeté

Au repos VCO_2 est d'environ 0,25 l/min chez l'homme (Wilmore *et al.*, 2009) et d'environ 1,5 à 2,1 l/min chez le cheval (de masse corporel 500 kg) (Hanak *et al.*, 2001). Le VCO_2 augmente de façon linéaire avec l'augmentation de l'intensité. A partir d'un certain niveau d'effort, la courbe d'évolution de VCO_2 marque un point de rupture signifiant un rejet de CO_2 plus marqué. Cette évolution est directement liée à l'augmentation du volume d'air expiré, puisque la ventilation suit une cinétique similaire jusqu'à ce qu'elle augmente aussi de manière disproportionnée à la demande *i.e.* hyperventilation. Le niveau à partir duquel la cinétique de la respiration change est appelé seuil ventilatoire (SV) (Figure 7). Il témoigne de l'intensité d'exercice à partir de laquelle la demande énergétique ne peut être uniquement satisfaite par les processus oxydatifs. Les mécanismes à l'origine de l'hyperventilation observée après SV sont encore aujourd'hui relativement discutés. Néanmoins, il semblerait que l'hyperventilation, au-delà de SV, soit essentiellement destinée à éliminer le CO_2 en excès et par ce biais à tamponner l'acidose (Wasserman *et al.*, 1973). Chez des athlètes tennismen, canoéistes et footballeurs entraînés, le SV serait atteint entre 70 et 85 % de VO_{2max} (Bunc *et al.*, 1987). Contrairement à l'homme, de nombreuses études réalisées sur les chevaux à l'effort maximal ont montré qu'ils ne présentent pas d'hyperventilation compensatrice à l'effort, expliquant d'ailleurs l'apparition d'hypoxémie et d'hypercapnie d'effort aux intensités d'exercices élevées. Néanmoins, certains auteurs ont montré qu'il existe un point de rupture dans les échanges respiratoires et que celui-ci était atteint à environ 63 % de VO_{2max} (McDonough *et al.*, 2002).

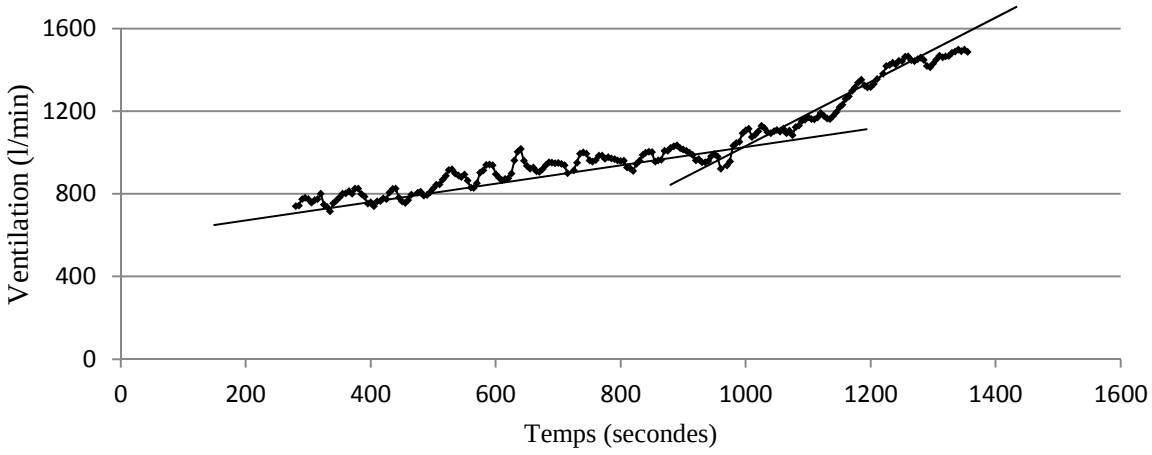

Figure 7. Evolution de la ventilation lors d'un effort progressivement croissant chez un cheval trotteur (d'après des données personnelles).

2.2.3 Le quotient respiratoire

Pour approcher la dépense énergétique corporelle totale, la mesure des échanges respiratoires permet de calculer le quotient respiratoire (QR). Il est obtenu en divisant le volume de CO_2 rejeté par le volume d'O_2 consommé, tel que :

$$QR = VCO_2 / VO_2$$

Le quotient respiratoire permet de connaître le type d'aliment oxydé (glucide ou lipide). En effet, pour l'homme et le cheval, la majeure partie des éléments énergétiques absorbés par l'organisme provient des grandes catégories de nutriments que sont les glucides et les lipides (Tableau 5). L'utilisation complète de ces nutriments nécessite l'intervention de l'oxygène atmosphérique afin de synthétiser des molécules nécessaires au renouvellement des tissus et de fournir l'énergie nécessaire au travail musculaire. En général, la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder complétement une molécule de glucide ou lipide est proportionnelle au nombre de carbones contenu dans le substrat. Si les produits terminaux de la dégradation des glucides et des lipides diffèrent chez l'homme et le cheval (Vermorel *et al.*, 1984), la consommation d'oxygène lors du métabolisme est fonction du type de substrat utilisé chez ces deux espèces. Ainsi, une fois calculé, la valeur de QR obtenue peut être comparée à d'autres, grâce à une table (Tableau 6) qui permet de déterminer la nature des substrats oxydés. Lorsque le QR est égal à 1, cela signifie que les cellules ont utilisé principalement du glucose (ou du glycogène) et que chaque litre d'O_2 consommé libère 5,05 kcal. Lorsque le QR est de 0,7 cela signifie que les substrats oxydés sont majoritairement les lipides, libérant 4,69 kcal par litre d'O_2 consommé.

Tableau 6. Equivalence calorique du quotient respiratoire (QR) et % kcal issu des glucides et lipides (d'après Wilmore et al., 2009).

	Energie	**% kcal**	
QR	Kcal/l O_2	Glucides	Lipides
0,71	4,69	0	100
0,75	4,74	15,6	84,4
0,80	4,80	33,4	66,6
0,85	4,86	50,7	49,3
0,90	4,92	67,5	32,5
0,95	4,99	84,0	16,0
1,00	5,05	100	0

Néanmoins, l'utilisation des échanges respiratoires pour mesurer les substrats énergétiques utilisés au cours de l'effort suppose que le contenu de l'organisme en O_2 reste stable et que les échanges pulmonaires de CO_2 sont proportionnels à sa libération par les cellules. Il est également estimé que la ventilation pulmonaire reste constante, alors que l'hyperventilation ou la réalisation d'un exercice intense, peut augmenter le contenu en CO_2 de l'air expiré. Dans ces conditions, la quantité de CO_2 rejetée par les poumons ne peut représenter précisément son niveau de production par les tissus. L'utilisation de cette méthode pour déterminer la nature des substrats utilisés n'est donc fiable qu'au repos ou lors d'un exercice sous maximal à intensité constante (Wilmore *et al.*, 2009). De plus, l'utilisation du QR peut parfois s'avérer inexacte notamment lorsque tous les nutriments ne sont pas complétement oxydés, par exemple certains glucides sont imparfaitement oxydés (polysaccharides végétaux) ou encore les protéines contenant de l'azote non oxydable. Au repos, l'organisme utilise une combinaison de ces substrats et les valeurs de QR sont fonction du mélange utilisé. A l'exercice, les muscles font appel aux glucides et le QR augmente au prorata de leur utilisation et donc de l'intensité de l'exercice. Plus l'organisme utilise du glucide et plus le QR sera proche de 1. Néanmoins, lors d'exercices intenses, il est fréquent de noter un QR supérieur à 1 chez l'homme (Solberg *et al.*, 2005) et chez le cheval (Tyler *et al.*, 1996), l'organisme rejette ainsi plus de CO_2 qu'il n'en est produit au niveau musculaire. Dans ce type d'exercice, l'organisme tente de limiter l'acidification du milieu, due à l'accumulation d'acide lactique, en rejetant plus de CO_2. Pour cette raison, les valeurs de QR proches de 1 ne permettent pas d'évaluer exactement le type de substrats utilisé par les muscles (Poortmans et Boisseau, 2012).

2.3 La concentration sanguine en lactate

Chez l'homme et chez le cheval, au cours d'exercice intense (*i.e.* au-dessus du seuil ventilatoire) une partie de l'énergie fournie provient de la glycolyse anaérobie. Lorsque l'exercice est réalisé dans des conditions partiellement anaérobies, la concentration en lactate dans le sang peut être utilisée comme témoin chimique de l'anaérobiose produit lors de la glycolyse anaérobie. Sa concentration dans le sang ne dépend pas seulement de la libération de l'acide lactique par le muscle, mais aussi simultanément des débits de production, diffusion, d'oxydation et de clairance de ce constituant. On estime toutefois que l'augmentation de la concentration en lactate dans le sang est corrélée à la quantité de lactate présente dans le muscle et peut donc constituer un indice représentatif de la production d'acide lactique dans l'organisme lors d'un exercice chez l'homme (Karlsson, 1971) et chez le cheval (Katz et Sahlin, 1988). Quelle que soit l'intensité d'exercice, les concentrations sanguines de lactate sont toujours inférieures à celles enregistrées au niveau musculaire (-30 à 35 %) (Poortmans et Boisseau, 2012). De plus, les valeurs de lactatémie à l'effort sont variables dans les différents compartiments sanguins. La concentration de lactate au niveau veineux (provenant du muscle actif) est toujours supérieure à celle observée au niveau artériel et dans les globules rouges. Au repos, les concentrations veineuses de lactate s'échelonnent entre 0,5 et 1,5 mmol/l chez l'homme (Poortmans et Boisseau, 2012) et chez le cheval (McKeever *et al.*, 2010). Au cours de l'effort, la lactatémie reste relativement stable jusqu'à une certaine intensité (Hermansen et Stensvold, 1972), à partir de laquelle elle s'accroît de façon exponentielle. Deux points de rupture dans la cinétique de la lactatémie au cours d'une épreuve maximale à charge croissante sont fréquemment observés. Le premier point d'inflexion représente le seuil lactique 1, intensité d'exercice pour laquelle la lactatémie augmente au-delà de sa valeur de repos. Ce dernier est couramment utilisé comme marqueur du potentiel endurant d'un athlète. Le deuxième seuil lactique est déterminé à partir d'une seconde rupture dans la cinétique de la lactatémie. Ainsi, au cours d'un effort maximal croissant, le seuil lactique 2 correspond à un point dans la cinématique, où la production de lactate dépasse sa clairance. A des intensités maximales et supra-maximales, les concentrations en lactate dans le plasma veineux peuvent atteindre 14-16 mmol/l chez des athlètes humains entraînés (Juel *et al.*, 1990 ; Balsom *et al.*, 1992) et 22-25 mmol/l chez les chevaux trotteurs (Roneus *et al.*, 1994 ; Pösö *et al.*, 1995).

L'étude des réponses adaptatives de l'organisme soumis à un effort renseigne sur les différents ajustements des grands systèmes de l'organisme. Les réponses cardiaque et ventilatoire sont directement influencées par l'intensité, la durée et le type d'effort, puisque l'augmentation de la demande liée à l'exercice entraîne des ajustements cardiorespiratoires immédiats. Les marqueurs i.e. la fréquence cardiaque, la consommation d'oxygène, le volume de dioxyde de carbone, le quotient respiratoire ou encore la lactatémie sont ainsi susceptibles d'être utilisés comme témoins des adaptations physiologiques et donc de la dépense énergétique liée à l'exercice. Néanmoins, leur utilisation peut parfois nécessiter beaucoup de précautions, comme la lactatémie, qui n'est en fait que la résultante d'une production et d'une élimination concomitante de lactate musculaire.

PARTIE 3

Les méthodes de mesure de la dépense énergique liée à l'exercice chez le cheval trotteur

Le renouvellement de l'énergie dans les fibres musculaires ne peut être mesuré directement. En effet, une fois les molécules polymères (protéines, glucides et lipides) transformées en substrats élémentaires, eux-mêmes transformés en molécules plus simples de trois (pyruvate) ou deux (acétate) carbones, une série de réactions en cycle libère du CO_2 et de grandes quantités de protons associés à du NAD et FAD qui sont ensuite réduits. Ces dernières molécules réduites sont alors associées à l'oxygène cellulaire par un mécanisme de phosphorylation qui forme de l'eau tout en réoxydant les molécules de NAD et FAD. C'est l'ensemble de ces réactions, présenté dans la Partie 1 de l'état de l'art, qui apporte la majeure partie de l'énergie libérée sous forme de nombreuses molécules d'ATP. S'il est impossible de quantifier directement cette énergie, de nombreuses méthodes de mesures indirectes permettent de calculer la quantité d'énergie dépensée par l'organisme. Ce chapitre présente plus en détails les méthodes de mesure de la dépense énergétique liée à l'exercice à partir des marqueurs physiologiques précédemment identifiés dans la Partie 2. Nous ne présenterons que les méthodes applicables aux conditions d'exercice qui ont déjà trouvé une application chez le cheval ou qui pourraient être appliquées.

3.1 L'approche indirecte de la dépense énergétique à partir de la fréquence cardiaque

3.1.1 La relation VO_2/FC

La dépense énergétique, estimée à partir de la fréquence cardiaque, est déterminée à partir d'équations de régression qui ont été établies en mesurant simultanément la consommation d'oxygène et la fréquence cardiaque au repos et au cours d'exercices incrémentaux. Rappelons-le, l'utilisation de la FC pour estimer la DE repose sur le postulat que la FC est directement liée à la VO_2 (Ainslie *et al.*, 2003). La nature de la relation entre la FC et la DE a été étudiée chez l'homme : cette relation ne s'avère pas toujours linéaire notamment pour les activités d'intensité faible et très élevée (Freedson et Miller, 2000 ; Levine, 2005). D'autres types de relations individuelles ont été explorées telles que la relation exponentielle (Li *et al.*, 1993 ; Bitar *et al.*, 1996), logarithmique (Schultz *et al.*, 1989) et polynomiale du second (Schultz *et al.*, 1989 ; Bitar *et al.*, 1996; Davidson *et al.*, 1997) ou du troisième degré (Bitar *et al.*, 1996). Il semble que la meilleure estimation de la dépense énergétique soit obtenue à partir de la relation individuelle entre FC et DE utilisant une relation polynomiale du troisième degré (Bitar *et al.*, 1996). Les pourcentages d'erreurs de DE diffèrent entre la méthode de mesure de FC et la méthode de référence utilisée (chambre calorimétrique, eau doublement marquée ou calorimétrie indirecte). L'étude de Bitar *et al.* (1996) montre qu'il existe un pourcentage d'erreur de 7,6 ± 20,1 % (relation polynomiale d'ordre trois), contre des erreurs de 9,8 ± 20,3% (relation linéaire), 15,3 ± 20,1 % (relation polynomiale d'ordre deux), 17,2 ± 17,5 % (deux relations linaires) et -12,2 ± 11,0 %

(relation logarithmique) dans l'étude de Schultz et al. (1989). D'autres auteurs ont indiqué un pourcentage de variation allant de - 17 à + 20 % (Spurr *et al.*, 1988 ; Livingstone *et al.*, 1990) dans l'estimation de la DE d'exercice.

L'utilisation de la fréquence cardiaque comme approche indirecte de la DE a trouvé une application chez le cheval en conditions expérimentales (Matsui *et al.*, 2004 ; Buzas *et al.*, 2009 ; Valle *et al.*, 2013), mais elle reste encore peu utilisée. Cela peut s'expliquer par la difficulté d'étalonner au préalable la courbe VO_2/FC pour chaque cheval. Matsui *et al.* (2004) ont estimé la DE de chevaux à partir d'enregistrements de FC à l'exercice, en ayant au préalable établi la courbe individuelle de régression VO_2/FC au cours d'un test d'intensité croissante sur tapis roulant. La régression obtenue entre VO_2 et FC était non linéaire pour des fréquences cardiaques inférieures à 100 bpm. Pour pallier la difficulté d'étalonnage entre VO_2/FC, Coenen a compilé les différentes publications et modélisé une relation entre VO_2/FC. Deux modèles, établis à partir de 564 et 569 paires de données (toutes races et conditions expérimentales confondues), ont été proposés en 2008 (Coenen, 2008) et 2010 (Coenen, 2010) respectivement. Les équations obtenues, de type puissance, étaient :

$$Y = 0{,}001946x^{2{,}0648}$$

Où y = VO_2 (ml/min/kg) et x = FC (bpm), r^2= 0,903 (Coenen, 2008)

$$Y = 0{,}02816x^{1{,}9955}$$

Où y = VO_2 (ml/min/kg) et x = FC (bpm), r^2= 0,911 (Coenen, 2010)

Cette méthode d'estimation de VO_2 à partir de FC a été récemment utilisée chez des chevaux de concours complets et des chevaux de polo afin d'estimer la dépense énergétique au cours d'exercice (Buzas *et al.*, 2009 ; Valle *et al.*, 2013).

Néanmoins, si la courbe VO_2/FC permet d'estimer la dépense énergétique de l'exercice, cette estimation s'avère améliorée si la dépense énergétique est prédite à partir d'une courbe individuelle entre VO_2 et FC (Li *et al.*, 1993). Les tests d'effort incrémentaux qui permettent d'établir cette régression nécessitent un protocole précis et rigoureux adapté à chaque discipline.

3.1.2 Les tests d'efforts incrémentaux

Le protocole d'un test incrémental, également appelé test triangulaire, doit être judicieusement choisi. En effet, il doit respecter les principes de l'activité pratiquée par le sujet, notamment en sollicitant les principales masses musculaires mises en jeu pendant l'activité. Par exemple pour les activités sollicitant les membres supérieurs chez l'homme, les tests incrémentaux sont souvent réalisés sur ergocycle à bras. Le protocole du test doit également respecter la nature même de l'activité *i.e.* effort continu *vs.* intermittent. Rappelons qu'un test incrémental consiste à réaliser un test par paliers

d'intensité croissante poursuivi jusqu'à ce que le sujet n'arrive plus à maintenir la vitesse de course imposée.

Il est possible de faire varier trois principaux paramètres : la vitesse initiale du test, les incréments de vitesse et la durée des paliers (Berthoin *et al.*, 2001 ; Bentley *et al.*, 2007). De nombreux auteurs en physiologie humaine se sont intéressés aux réponses adaptatives induites par la modification de ces paramètres. Par exemple, il a été démontré que si la vitesse initiale était trop faible ou trop élevée, induisant une durée de test inférieure à 8 min ou supérieure à 17 min, les sujets n'atteignaient pas leur capacité cardiorespiratoire maximale (Buchfuhrer *et al.*, 1983). Cette conclusion a été validée par Yoon *et al.* (2007) qui ont comparé quatre durées (5, 8, 12, et 16 min) lors d'un test incrémental sur vélo. Ils ont conclu que le protocole de 8 min induisait des réponses de VO_2 significativement plus élevées que les trois autres durées. La durée des paliers a également fait l'objet d'étude, où Bishop *et al*. (1998) ont testé l'effet de la durée des paliers (1 *vs.* 3 min) sur les réponses cardiorespiratoires de femmes modérément actives. Les auteurs ont indiqué qu'aucune différence significative n'avait été observée sur VO_{2max}, mais que FC_{max} était significativement plus faible lors du test avec des paliers de 1 min comparée au test avec des paliers de 3 min. Zhang *et al.* (1991) confirment que les réponses de VO_{2max} n'étaient pas différentes au cours de tests faisant varier la durée des paliers de 1, 2 et 3 min, tant que les incréments de vitesse étaient maintenus constants tout au long du test. De plus, les tests incrémentaux sont couramment réalisés sans échauffement, expliquant l'intérêt certain de la vitesse initiale du test. La vitesse initiale est déterminée en fonction du niveau des sujets, et les tests débutent souvent à environ 50 % de la vitesse à VO_{2max} (vVO_{2max}) pour des athlètes d'un niveau intermédiaire (Lèger *et al.*, 1988). Pour les athlètes très entraînés, il n'est pas rare en pratique de les voir démarrer un test incrémental à 12 km/h pour respecter une durée d'effort inférieure à 15-16 min.

Chez le cheval, à notre connaissance, aucune étude n'a investigué les réponses cardiorespiratoires au cours de tests incrémentaux faisant varier ces différents paramètres.

Les tests continus

Les tests continus sont autant pratiqués en laboratoire que sur piste chez l'homme. Léger et Boucher (Léger et Boucher, 1980) sont les premiers à avoir proposé un test progressif, indirect, continu et maximal, initialement utilisé pour évaluer VO_{2max} des sujets : le test de course sur piste de l'Université de Montréal. Ce test débute à une vitesse de 6 km/h, la vitesse est incrémentée de 1,2 km/h toutes les 2 min. L'épreuve prend fin lorsque le sujet n'est plus capable de suivre le rythme imposé. Les auteurs retiennent alors comme performance la vitesse au dernier palier entièrement couru, la vVO_{2max}. Ce test s'est avéré reproductible, indépendamment du sexe et du niveau de performance chez l'adulte (Léger et Boucher, 1980) et chez l'enfant en milieu scolaire (Berthoin *et al.*, 1995). Par la suite, plusieurs versions de ce test ont été proposées. Par exemple, dans le protocole de Brue (1985), la vitesse est imposée par un cycliste que les sujets suivent seul ou en groupe. Les augmentations de vitesse sont de

0,2 à 0,3 km/h par paliers de 30 s. Cazorla (1990) proposait de placer des repères tous les 20 m autour d'une piste (au lieu de 50 m) et réduisait les augmentations de vitesse (0,5 km/h par minute).

Chez le cheval, les tests incrémentaux continus sont également utilisés pour évaluer les capacités individuelles des chevaux mais restent aujourd'hui principalement conduits en conditions de laboratoire sur tapis grande vitesse. Parmi eux, le test mis en place par Evans *et al.* (1988) semble le plus utilisé. Ce test débute par un échauffement au trot de 3 min à 4 m/s (14,4 km/h) sur un tapis incliné à 10 %, puis la vitesse est augmentée toutes les minutes et les paliers sont 6, 8, 10, 11 m/s (21,6 ; 28,8 ; 36,0 et 39,6 km/h respectivement) jusqu'à ce que les chevaux ne puissent plus maintenir l'allure. Quelques variantes à ce test ont été apportées, comme la réalisation de 2 min d'effort à 6 m/s (21,6 km/h) après l'échauffement de 3 min (Eaton *et al.*, 1999). Morris *et al.* (1991) ont proposé un test d'effort incrémental qui a été adapté au cheval trotteur par Gauvreau *et al.* (1995). Ce test consistait à réaliser un échauffement de 7 min, composé de 2 min de pas à 1,6 m/s (5,7 km/h), suivi de 2 min de trot à 4,0 m/s (14,4 km/h) et de 3 min au trot à 4,0 m/s (14,4 km/h) avec une inclinaison de 3°. Immédiatement après l'échauffement, les chevaux réalisaient un test incrémental où la vitesse était augmentée toutes les minutes et les paliers de vitesse étaient 4, 6, 8, 9, 10, 11 et 12 m/s (soit 14,4 ; 21,6 ; 28,8 ; 32,4 ; 36,0, 39,6 et 43,2 km/h respectivement) à 3° d'inclinaison. Si les expérimentateurs décidaient que le cheval n'avait pas atteint un niveau maximal de VO_2, il poursuivait son effort en réalisant un ultime palier de vitesse pendant au moins 90 s à une vitesse supérieure à celle du dernier palier. Plus récemment, Van Erck *et al.* (2007) ont mis en place un test d'effort sur tapis roulant chez des chevaux trotteurs. Ce test débutait par un échauffement de 5 min au pas et de 5 min au trot, qui était suivi d'un exercice de 3 paliers à 7,4 ; 8,3 et 9,7 m/s (26,6 ; 29,9 et 34,9 km/h) sur un tapis roulant incliné à 4°. Entre chaque palier, les chevaux trottaient à 5 m/s (18 km/h) pendant 2 min avec 0° d'inclinaison.

Les tests intermittents

Si tout ce qui n'est pas continu est intermittent pour l'Association des Entraîneurs du Nord de l'Amérique, il est couramment défini que les exercices intermittents font intervenir une alternance de périodes de travail et de récupération au cours desquelles la récupération n'excède pas 30 s (Gacon, 1999).

Chez l'homme, les tests intermittents permettent d'estimer les capacités maximales des sujets, bien que les réponses enregistrées semblent différentes de celles mesurées lors de tests continus. Par exemple, au cours d'un test incrémental intermittent de type 30/15, il a été montré que la vitesse obtenue à l'arrêt du test, appelé vitesse à VO_{2max} (vVO_{2max}) était plus grande que celle obtenue au cours d'un test continu, alors que VO_{2max} et FC_{max} étaient similaires au test continu (Buchheit, 2005). Il a également été démontré que lors d'un exercice intermittent de type 15/15, il fallait courir à une vitesse représentant 110% de la vVO_{2max} évaluée au test sur piste de l'Université de Montréal. La vitesse atteinte lors de tests incrémentaux intermittents nécessite donc d'être adaptée pour obtenir une

vitesse de travail adaptée à une sollicitation aérobie maximale. Cette adaptation a d'ailleurs fait l'objet d'études visant à définir le concept de pondération (Gacon, 1993). La principale explication dans la différence entre tests intermittents et continus réside dans les sollicitations énergétiques induites par les temps de travail et de récupération, permettant d'atteindre une vitesse de course 10 à 20 % plus rapide qu'en continu. Par exemple, dans une étude portant sur la comparaison d'un test incrémental continu sur tapis roulant à un test incrémental intermittent le «Yo-Yo recovery test », Castagna *et al*. (2006) ont montré que les niveaux d'ATP, de PCr, de glycogène baissaient et que la concentration en lactate sanguin augmentait témoignant une sollicitation anaérobie.

Chez le cheval, les tests intermittents sont principalement réalisés sur le terrain (Tableau 7). Chez le cheval trotteur plus particulièrement, les tests incrémentaux intermittents ont pour objectif d'évaluer leur niveau de condition physique (Couroucé *et al.*, 1997 ; Essén-Gustavsson *et al.*, 1997 ; Davie *et al.*, 2002). Le premier test mis en place consistait à réaliser 4 paliers de 1000 m à 7,5 - 8,3 m/s (27,0-29,8 km/h), 10,0 - 11,6 m/s (36,0-41,7 km/h), 11,6 - 13,3 m/s (41,7 - 47,9 km/h) et plus de 13,3 m/s (47,9 km/h) respectivement (Wilson *et al.*, 1983). Chaque palier était entrecoupé d'une récupération au pas de 3-5 min. Puis d'autres versions ont été proposées, 5 paliers de 1000 m à 9,1 ; 9,5 ; 10,0 ; 10,5 et 11 m/s (32,8 ; 34,2 ; 36,0 : 37,8 et 39,6 km/h respectivement) (Ronéus *et al.*, 1999), ou encore 3 paliers de 1000 m à 7,6 ; 8,5 et 10 m/s (27,4 ; 30,6 et 36,0 km/h) suivi d'un palier de 500 m à vitesse maximale, avec 2 min de récupération au petit trot entre chaque palier (Van Erck, 2007). Demonceau et Auvinet (1992) ont proposé un test de terrain en fonction du statut d'entraînement et de l'âge des trotteurs. Le test était composé d'un échauffement de 10 min à 5,8 m/s (20,9 km/h), suivi de 3 paliers de 3 min. La vitesse au palier 1 était comprise entre 7,3 et 8,3 m/s (26,3 et 29,9 km/h) en fonction de la durée d'entraînement des chevaux, de moins 4 mois à plus de 24 mois. Les incréments entre paliers variaient entre 0,7- 1,3 m/s (2,5 - 4,7 km/h) en fonction des critères précédemment indiqués. La récupération entre les paliers était de 1 min au pas. Ce test a été de nombreuses fois utilisé pour investiguer le niveau de condition physique de chevaux trotteurs en conditions de terrain (Dubreucq *et al.*, 1995 ; Couroucé *et al.*, 1999 ; Couroucé-Malblanc *et al.*, 2008). Davie *et al.* (2002) ont proposé un test de terrain consistant à parcourir 2500-3000 m d'échauffement à faible vitesse, suivi de 2 sessions de 1600 m, à 10 et 12 m/s (36,0 et 43,2 km/h), avec 5 min de repos au pas entre les sessions. Bien que ce protocole expérimental présente une augmentation de vitesse entre les deux phases d'exercice, il semble néanmoins délicat de considérer ce test comme un test incrémental puisque le temps de récupération entre les sessions dépasse 30 s.

Les différents tests d'effort proposés chez le cheval trotteur respectent le principe fondamental de la discipline, *i.e.* locomotion exclusivement au trot. Ces tests évaluent principalement le niveau de sollicitation physiologique pour une intensité donnée, souvent sous maximale. De plus, l'effort de course du cheval trotteur consiste en un effort continu (entre 1600 et 4200 m) pourtant l'ensemble des tests incrémentaux de terrain sont réalisés de manière intermittente. Ceci peut partiellement être

expliqué par la volonté d'évaluer les réponses métaboliques au cours du test comme la cinétique du lactate. Le temps d'arrêt entre chaque palier (environ 2 min) est justifié pour pouvoir réaliser une prise de sang sur un cheval, néanmoins il reste relativement long pour un test d'effort, induisant des réponses adaptatives non maximales. Si chez l'homme, les phases de travail et de récupération au cours des tests incrémentaux sont très brèves (entre 5 et 60 s), cette application semble impossible à réaliser chez le cheval, dû au temps nécessaire pour amener le cheval à une vitesse souhaitée et pour l'arrêter. De plus, le nombre de palier lors des tests incrémentaux, défini en amont, suggère que l'ensemble des chevaux testés ont des capacités physiques similaires, limitant aussi l'exploration des capacités. La définition du protocole le plus adapté repose donc sur une réflexion préalable concernant l'activité en elle-même et renseigne sur l'importance de traiter individuellement l'évaluation des sollicitations cardiorespiratoires.

Chez l'homme, l'adaptation des tests triangulaires à la pratique de terrain, en fait un outil couramment utilisé tant en conditions contrôlées qu'en milieu sportif et scolaire. Ces tests apportent de précieuses données individuelles sur le fonctionnement et les limites maximales du système cardiorespiratoire mais aussi ils permettent l'étalonnage VO_2/FC pour une quantification énergétique de la DE aérobie lors des exercices d'entraînement. Chez le cheval, les tests incrémentaux existants sont principalement réalisés pour déterminer le fonctionnement du système cardiorespiratoire et/ou pour déterminer le niveau de condition physique sur tapis roulant (Evans et Rose, 1988 ; Morris et Seehermann, 1991). L'utilisation de ces tests, toujours restreinte aux conditions contrôlées, s'avère peu fréquente pour établir individuellement la relation VO_2/FC. Bien que la variabilité de l'estimation de la DE par cette méthode ne soit pas connue chez le cheval, et que les résultats soient dépendants de la courbe de régression VO_2/FC, elle reste néanmoins très pratique et facile d'utilisation et a l'avantage d'estimer la DE d'exercice pour toute discipline en conditions réelles d'exercices chez le cheval.

Tableau 7. Tests d'effort de terrain existant dans la littérature chez le cheval trotteur.

Références		Echauffement	Palier1	r	Palier 2	R	Palier 3	r	Palier 4	r	Palier 5
Wilson *et al.* (1983)	Allure Durée (min) Vitesse (m/s) Distance (m)	nc	Trot - 7,5-8,3 1000	Pas 3-5 - -	Trot - 10,0-11,6 1000	Pas 3-5 - -	Trot - 11,6-13,3 1000	Pas 3-5 - -	Trot - +13,3 1000		
Ronéus *et al.* (1999)	Allure Durée (min) Vitesse (m/s) Distance (m)	nc	Trot - 9,1 1000	nc	Trot - 9,5 1000	Nc	Trot - 10,0 1000	nc	Trot - 10,5 1000	nc	Trot - 11 1000
Van Erck *et al.* (2007)	Allure Durée (min) Vitesse (m/s) Distance (m)	Pas et Trot 10 nc nc	Trot - 7,6 1000	Trot 2 - -	Trot - 8,5 1000	Trot 2 - -	Trot - 10,0 1000	Trot 2 - -	Trot - 11,9 500		
Demonceau et Auvinet, (1992)	Allure Durée (min) Vitesse (m/s) Distance (m)	Trot 10 5,8 -	Trot 3 7,3-8,3 -	Pas 1 - -	Trot 3 8,0-9,7 -	Pas 1 - -	Trot 3 8,7-11,0 -				
Davis *et al.* (2002)	Allure Durée (min) Vitesse (m/s) Distance (m)	Trot nc nc 2500-3000	Trot - 10,0-12,0 1600	Pas 5 - -	Trot - 10,0-12,0 1600						

r : récupération entre les paliers ; nc : données non communiquées.

3.2 La méthode de calorimétrie indirecte à partir de la consommation d'oxygène

Il existe de nombreuses méthodes pour mesurer les échanges gazeux respiratoires en O_2, allant de méthodes relativement simples à des méthodes sophistiquées et coûteuses. Nous présenterons ci-après les trois principales méthodes. Dans toutes ces méthodes, la dépense énergétique est calculée à partir de la consommation d'oxygène et de l'équivalent énergétique du litre d'oxygène, où :

$$DE = VO_2 \text{ x équivalent calorique}$$

Où DE est exprimée en kilocalorie (kcal) et VO_2 en litre (l).

L'équivalent calorique représente la chaleur produite lorsqu'un litre d'oxygène est consommé. La valeur moyenne de l'équivalent calorique couramment utilisé est 4,825 kcal/l d'O_2 (Faisy et Taylor, 2009), bien que la nature des substrats oxydés détermine plus précisément l'équivalent calorique à choisir. Celui-ci varie entre 4,69 et 5,05 kcal/l d'O_2 pour des QR entre 0,71 et 1,0 respectivement.

3.2.1 Le système de collecte totale avec valve de non-retour (non-rebreathing valve)

Dans ce dispositif, l'air expiré est recueilli dans un contenant hermétique, structure rigide ou sac souple. La méthode Sac de Douglas (Douglas, 1911) est un exemple de système souple de collecte utilisé autant chez l'homme que chez le cheval. Il comprend un sac étanche, de capacité variable en fonction de l'espèce, dont la partie supérieure est reliée à une vanne à trois voies qui peut être mise en rotation, soit pour fermer le sac, soit pour admettre de l'air atmosphérique, soit pour admettre l'air expiré dans un tube attaché à une valve respiratoire. Le sujet humain ou équin respire par un embout et la vanne à trois voies est mise en rotation pour permettre la collecte de l'air. Après la période de collecte, la vanne se ferme pour sceller le sac. Plusieurs sacs peuvent être utilisés pour prolonger la période de mesure totale (Daniel, 1971). Les pourcentages en O_2 et CO_2 sont alors mesurés dans l'air expiré (à l'aide d'un spectromètre de masse) et le volume d'air expiré est mesuré (grâce à un débitmètre) puis exprimé par unité de temps. Sur la base de ces données mesurées, VO_2 et VCO_2 sont ainsi calculées. Une correction reste néanmoins à apporter aux valeurs. En effet, lorsque les gaz sont expirés, ils proviennent de l'organisme où ils sont à température corporelle (Body Temperature en anglais), à pression ambiante (P) et saturés en vapeur d'eau (S). Ce sont les conditions dites « BTPS ». Par convention, tous les volumes de gaz mesurés dans les conditions BTPS doivent être convertis en conditions Standards de température (T), de pression (P) dans un air sec (D pour Dry en anglais) (STPD). Ceci permet entre autre de pouvoir comparer les données de différents laboratoires et dans différentes conditions atmosphériques. Ces différentes corrections sont permises par une série d'équations, régie notamment par les règles de Charles et Boyle (Nunn, 1993).

Bien que cette méthode ait déjà été utilisée chez le cheval en conditions de repos (Figure 8) et d'exercice sur tapis roulant (Minetti *et al.*, 1999 ; Marlin et Nankervis, 2002), elle semble néanmoins

peu appropriée pour des mesures à l'effort. En effet, la résistance à l'écoulement des vannes limite l'utilisation de ce dispositif en conditions d'exercice, tout comme le fait que ce système ne permette pas d'obtenir les informations sur les changements brefs de VO_2 et VCO_2. Néanmoins, en conditions optimales, l'erreur de mesure est relativement faible (3 %), faisant de ce système une méthode robuste souvent utilisée comme méthode de référence chez l'homme (Rietjens *et al.*, 2001).

Figure 8. Utilisation du sac de Douglas chez un cheval au repos (d'après Marlin et Nankervis, 2002).

3.2.2 Les systèmes de collecte en circuit ouvert (open flow, bias flow systems)

Les systèmes en circuit ouvert peuvent être utilisés pour enregistrer la DE sur plusieurs heures ou jours, selon la configuration choisie et les conditions expérimentales. Dans un système à circuit ouvert, le sujet humain ou équin inspire de l'air et les gaz expirés sont ensuite analysés. Il existe deux types de systèmes en circuit ouvert: les systèmes ventilés en circuit ouvert où le sujet respire dans un conteneur à travers lequel l'air est aspiré, et les systèmes de collecte expiratoire où un sujet inspire de l'air atmosphérique et expire par l'intermédiaire d'un masque anti-retour.

Les systèmes ventilés en circuit ouvert

En général, les systèmes ventilés en circuit ouvert, composés d'éléments qui collectent et mélangent l'air expiré, mesurent le débit d'air, analysent les concentrations en gaz et pompent l'air à travers le système. La méthode de collecte peut varier considérablement. L'approche la moins complexe consiste à recueillir l'air expiré à l'aide d'un embout buccal ou masque (Wilmore *et al.*, 1976). Les mesures peuvent être effectuées jusqu'à plusieurs heures. L'approche la plus complexe consiste à placer le sujet dans une pièce ou chambre dont le volume est connu, dans laquelle il existe souvent des dispositifs

sophistiqués pour quantifier l'activité physique chez l'homme (Sun et Hill, 1993). Peu importe le système utilisé, le fonctionnement des dispositifs reste le même. En effet, l'air expiré est attiré dans le dispositif de collecte à l'aide d'une pompe, il est ensuite mélangé à l'aide d'un ventilateur et/ou d'une chambre de mélange, et enfin l'échantillon d'air expiré est séché et analysé pour déterminer VO_2. La consommation d'oxygène est généralement analysée à l'aide d'un analyseur type paramagnétique (l'oxygène étant fortement attiré par un champ magnétique puissant).

Les systèmes ventilés en circuit ouvert ont une précision de mesure d'environ 0,5-2 %. Selon le dispositif choisi, le temps de réponse peut fortement varier, allant de 5 à 30 min pour une chambre, à 30 s pour un masque ou embout buccal chez l'homme. Chez le cheval, ces informations n'ont, à notre connaissance, jamais été rapportées.

Les systèmes expiratoires en circuit ouvert

Il existe plusieurs systèmes expiratoires en circuit ouvert. En général chez l'homme, ces dispositifs comportent un embout buccal ou un masque relié à une vanne par laquelle l'air expiré entre dans le système. Le taux d'écoulement de l'air expiré à travers la soupape est mesuré et une faible proportion, déviée vers un réservoir de stockage, est analysée à la fin de la période de mesure. Les mesures peuvent être effectuées de quelques minutes à plusieurs heures. Les avancées technologiques ont abouti à la conception de calorimètres portables, de plus en plus précis, relativement solides et fiables, avec une précision de mesure d'environ 5 % susceptibles de fournir des données de terrain chez les athlètes humains (McLaughlin *et al.*, 2001 ; Rietjens *et al.*, 2001). Dans les années 1990, la firme Cosmed a développé un système portable (K2) composé d'un masque facial, d'un débitmètre, d'un analyseur de gaz en O_2 et d'un récepteur télémétrique. Ce système a été validé en comparant les réponses cardiopulmonaires à celles obtenues avec des méthodes de références telles que les sacs de Douglas (Kawakami *et al.*, 1992) et des analyseurs fixes conventionnels (Lucia *et al.*, 1993 ; Crandall *et al.*, 1994). Une nouvelle version (K4b²) (Figure 9), équipée d'un analyseur CO_2 permettant des mesures respiration par respiration, a ensuite été proposée par Cosmed. Le système K4b², validé chez l'homme (Hausswirth *et al.*, 1997 ; McLaughlin *et al.*, 2001 ; Duffield *et al.*, 2004), permet ainsi de mesurer en continu le débit ventilatoire, la consommation d'oxygène, la production de gaz carbonique ainsi que la FC. Le K4b² mesure précisément la VO_2 quel que soit le niveau d'intensité de l'exercice (Hausswirth *et al.*, 1997 ; McLaughlin *et al.*, 2001 ; Duffield *et al.*, 2004).

Chez le cheval, la mesure des gaz respiratoires via un masque facial peut être fixe (relié à un analyseur fixe) ou portable (relié à un analyseur embarqué) (Figure 9). Si le système de type fixe est largement utilisé chez le cheval, faisant office de méthode de référence (Bayly *et al.*, 1987 ; King *et al.*, 1994 ; Katz *et al.*, 1999 ; Marlin et Nankervis, 2002), le système portable reste encore relativement peu utilisé aujourd'hui. Les premiers systèmes embarqués, beaucoup moins aboutis qu'aujourd'hui, consistaient soit à transmettre les données par télémétrie (Hörnicke *et al.*, 1984), soit à tracter le calorimètre sur une remorque à proximité des chevaux (Pagan et Hintz, 1986). Il a fallu attendre 2006 pour que la

firme Cosmed élabore, sur le modèle du dispositif humain, le K4b² équin avec le masque Equimask adapté à la morphologie des chevaux. Ce dispositif a été validé scientifiquement par comparaison à une méthode de référence (Art *et al.*, 2006). Depuis, quelques équipes de recherche ont réalisé des essais avec ce dispositif (Votion *et al.*, 2006 ; Van Erck *et al.*, 2007 ; Leprête *et al.*, 2009 ; Cottin *et al.*, 2010). Testés dans différentes conditions et disciplines, les premiers résultats ont été relativement controversés. En effet, certaines études ont rapporté des biais et une sous-estimation de la fraction expirée en CO_2 ($FeCO_2$) et/ou une sous-estimation du débit ventilatoire (V_E) (Art *et al.*, 2006 ; Van Erck *et al.*, 2007) à des exercices d'intensités d'élevées. Néanmoins, les données de VO_2 mesurées étaient acceptables et reproductibles (Art *et al.*, 2006).

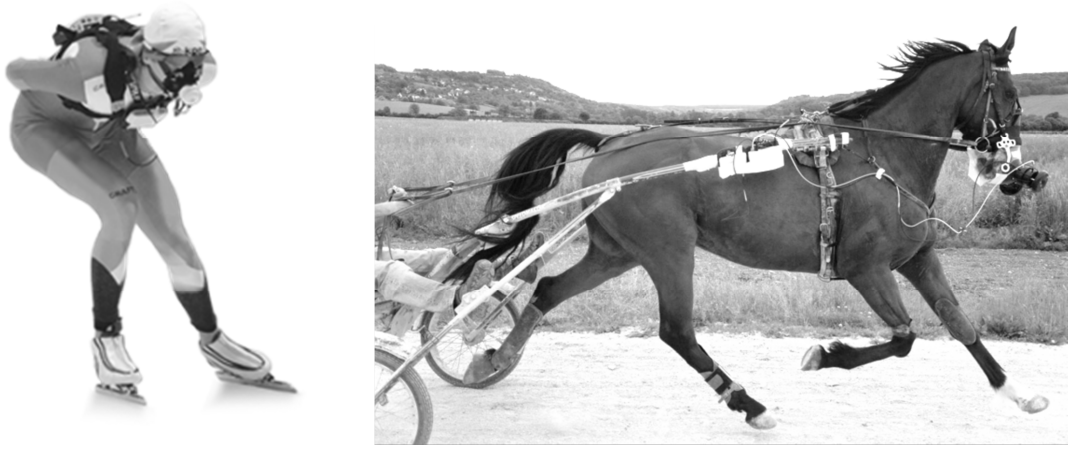

Figure 9. Utilisation du K4b² (Cosmed, Rome, Italie) sur des athlètes humain (d'après www.cosmed.com) et équin (d'après des données personnelles).

3.2.3 Le système de collecte en circuit fermé

Avec ce dispositif, la consommation d'oxygène est mesurée à l'aide d'un spiromètre. La spiromètrie consiste en un circuit d'air relié à des analyseurs, où le sujet respire dans un embout buccal avec ses voies nasales bloquées par un pince-nez. Les premiers spiromètres étaient les spiromètres à cloche. Ils consistaient en un circuit fermé comportant une cloche équilibrée par un contrepoids capable de se déplacer verticalement. La cloche était plongée dans une cuve remplie d'eau de telle sorte qu'elle formait un réservoir d'air de volume variable. Les variations de volume étaient avant enregistrées par une plume sur un papier qui tourne sur un cylindre. Actuellement, le tracé s'affiche directement sur les écrans d'ordinateurs. De manière plus récente, les spiromètres ont été construits avec des pneumotachographes, qui mesurent les débits gazeux instantanés (Totora et Grabowski, 2002).

Chez le cheval ce dispositif a été utilisé, mais il semble plus adapté pour des mesures au repos qu'à l'exercice puisque le masque limite fortement la respiration à l'effort (Cruz *et al.*, 2006 ; Geor, 2001).

La calorimétrie indirecte permet une approche globale de la dépense énergétique, avec des erreurs de ± 5 % si les conditions optimales sont respectées (Poortmans et Boisseau, 2012). Elle permet également d'évaluer la dépense énergétique dans différentes conditions physiologiques et notamment en conditions d'exercice. Chez l'homme, en système fixe ou portable, la calorimétrie indirecte est couramment utilisée en conditions contrôlées mais aussi en routine dans l'entraînement sportif afin d'évaluer, contrôler et suivre les effets d'un entraînement mais également afin d'évaluer le niveau de condition physique et/ou d'investiguer la dépense énergétique liée à l'effort des athlètes. Chez le cheval, la calorimétrie indirecte est exclusivement utilisée en conditions contrôlées où le système fixe fait office de méthode de référence et le système portable est peu utilisé. Bien que le système portable ait présenté quelques biais au cours des exercices d'intensités élevées, il permet néanmoins de mesurer les réponses respiratoires adaptatives à l'exercice sous-maximal et offre de nouvelles perspectives pour quantifier la DE induite par l'activité physique en conditions réelles d'exercices des chevaux, et ceux pour toutes les disciplines.

3.3 Les méthodes de calorimétrie indirecte et de l'eau doublement marquée à partir du volume de dioxyde de carbone

La mesure du VCO_2 peut être quantifiée par calorimétrie indirecte, comme nous venons de le voir pour la consommation d'oxygène, mais aussi selon la méthode de l'eau doublement marquée. Cette dernière consiste à déterminer la production de dioxyde de carbone en mesurant la différence d'élimination d'isotopes stables marqués (deutérium et oxygène-18) à partir de l'eau corporelle totale. Le sujet ingère de l'eau contenant une concentration connue d'isotopes d'hydrogène (deutérium) et d'oxygène (oxygène-18) dont la quantité dépend de sa masse corporelle. Les isotopes se mélangent à l'eau corporelle et sont éliminés en quelques jours dans les fluides corporels. L'hydrogène marqué est éliminé du corps sous forme d'eau (urines principalement, sueur, salive, respiration) et l'oxygène marqué est éliminé sous forme d'eau et de dioxyde de carbone (Figure 10). Le métabolisme est estimé en mesurant quotidiennement la concentration de deutérium dans des échantillons d'urine ou de salive. La différence de taux d'excrétion entre les traceurs, déterminé au moyen d'un spectromètre de masse, reflète le volume de dioxyde de carbone produit pendant la période d'observation (3 semaines maximum). La dépense énergétique est alors calculée à partir du VCO_2 et de l'équivalent calorique du dioxyde de carbone calculé à partir du quotient respiratoire (Montoye *et al.*, 1996).

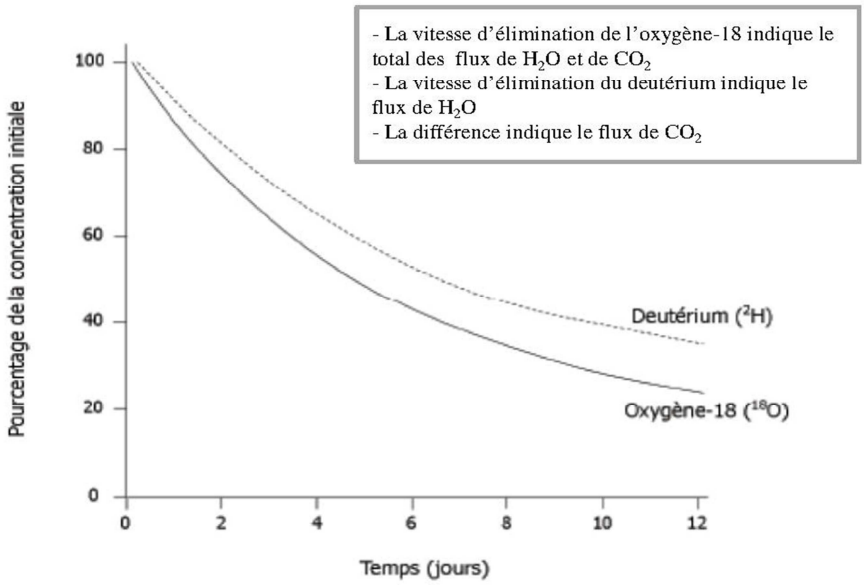

Figure 10. Cinétique de disparition des isotopes ^2H et ^{18}O (d'après Gastinger, 2010).

La capacité de l'eau doublement marquée à mesurer une dépense énergétique a été testée initialement sur des animaux au cours des années 1950 (Lifson *et al.*, 1955) pour être ensuite appliquée chez l'homme. Cette méthode présente une précision de ± 5 % chez l'homme lorsque les valeurs de dépense énergétique sont comparées aux données obtenues par la chambre calorimétrique (Schoeller *et al.*, 1986) ou par d'autres méthodes de mesure des échanges gazeux (Schoeller et Van Santen, 1982). Ainsi, la précision et la nature non invasive de cette méthode en font un outil idéal pour l'étude du métabolisme énergétique chez l'homme en condition de vie quotidienne. Elle est aussi utilisée comme méthode de référence pour valider les méthodes indirectes (Schoeller, 1999). Si elle présente l'avantage de calculer une dépense énergétique globale sur une période de temps déterminée, elle ne permet pas de connaître la quantité d'énergie dépensée sur des périodes plus brèves à l'intérieur de cette période de temps, comme l'exercice.

Chez les équins, la méthode de l'eau doublement marquée a été validée scientifiquement par Fuller *et al.* (2004). Après avoir défini le taux de disparition des isotopes sur des poneys (Midwood, 1990), les auteurs ont comparé la méthode de l'eau doublement marquée à une méthode de référence (chambre respiratoire) chez des poneys au repos. Puis cette méthode a de nouveau été utilisé chez des poneys dans l'objectif de quantifier la masse grasse (Dugdale *et al.*, 2011). A notre connaissance, elle n'a jamais été utilisée chez le cheval à l'exercice pour quantifier la dépense énergétique totale, probablement en raison de la complexité de la technique et du matériel nécessaire.

3.4 L'approche de la dépense d'énergie anaérobie à partir de la lactatémie

Chez l'homme, l'estimation de la dépense énergétique anaérobie à partir des concentrations en lactate est réalisé à partir d'un équivalent énergétique lactique compris entre 2,7 et 3,0 ml d'O_2/kg/mmol (Di Prampero, 1981 ; Di Prampero et Ferretti, 1999 ; Bertuzzi *et al.*, 2007 ; Bertuzzi *et al.*, 2013). Bien que l'équivalent calorique du lactate permette d'évaluer la contribution anaérobie, cette dernière reste incomplète, compte tenu de la difficulté à mesurer les variations des concentrations en molécules d'ATP et en PCr mobilisées par le système anaérobie ATP-PCr. Parmi les indicateurs caractérisant la contribution anaérobie dans la fourniture énergétique totale, la lactatémie reste néanmoins le marqueur le plus utilisé dans la communauté scientifique.

A notre connaissance, il n'existe pas d'équivalent énergétique du lactate chez le cheval, bien que les travaux de Coenen aient indiqué une modélisation du taux de lactate en fonction de la fréquence cardiaque et de la vitesse de course (Coenen, 2010). La poursuite de ces travaux pourrait permettre de définir un équivalent énergétique du lactate propre au cheval. Les travaux réalisés jusqu'à ce jour ont principalement tenté de définir les liens entre le lactate et la performance (Couroucé *et al.*, 1997 ; Lindner, 2010) ou le lactate et l'entraînement (Campbell, 2011), les prochaines investigations pourraient alors concerner l'énergétique anaérobie.

La mesure des gaz respiratoires via un masque facial est probablement la méthode la plus appropriée à l'étude des adaptations respiratoires du cheval à l'effort. C'est d'ailleurs la méthode de référence chez le cheval lorsque les échanges respiratoires sont mesurés avec un analyseur fixe. En conditions de terrain, les méthodes de quantification énergétique utilisables chez le cheval à l'exercice sont relativement limitées, bien qu'à ce jour la mesure de la consommation d'oxygène soit possible. Elle permet ainsi d'étudier la dépense énergétique occasionnée par l'activité physique en conditions réelles d'exercice i.e. poids porté/tracté, conditions environnementales, état des sols, embouchure, (…). L'appareil portable K4b² équin ouvre ainsi de nouveaux champs d'investigation en recherche équine, bien que son utilisation ait démontré quelques limites. De plus, l'estimation de la consommation d'oxygène et de la dépense énergétique à partir de mesures de fréquence cardiaque semble une approche intéressante et facilement utilisable chez le cheval en conditions de terrain. Néanmoins, cette approche est peu utilisée, probablement en raison de la nécessité d'étalonner la régression entre la consommation d'oxygène et la fréquence cardiaque au préalable pour chaque individu.

PROBLEMATIQUE & OBJECTIFS DE LA THESE

Afin d'assurer santé et performance sportive des chevaux athlètes, leurs besoins énergétiques nécessitent d'être précisés par discipline en quantifiant la somme des dépenses énergétiques, dont celles liées à l'activité physique qui est l'un des principaux facteurs de variations de la dépense énergétique des athlètes.

L'estimation de la dépense énergétique liée à l'exercice nécessite en amont de connaître précisément les exercices utilisés dans l'entraînement des chevaux. En effet, les caractéristiques des exercices influencent directement l'intensification du fonctionnement des appareils respiratoire et cardiaque et de ce fait la dépense énergétique (Vermorel *et al.*, 1984 ; Levine, 2005 ; Bertuzzi *et al.*, 2007). Or, chez le cheval trotteur, les pratiques et les exercices d'entraînement nécessitent d'être précisément décrits. ***Il est ainsi indispensable d'investiguer dans un premier temps les exercices d'entraînement avec un focus particulier sur l'intensité, le volume et le type d'exercice spécifiques à la discipline du trot attelé.***

La caractérisation de l'intensité d'exercice en fonction des capacités individuelles est également nécessaire. En effet, les sportifs, qu'ils soient humains ou équins, ne possèdent pas tous la même capacité d'adaptation à l'exercice et à l'entraînement. Ces variations individuelles sont en relation avec des variations d'ordre cellulaire, métabolique ou impliquant la régulation nerveuse et endocrine. Pour ces raisons, tout exercice et programme d'entraînement doivent prendre en compte les besoins spécifiques et les capacités de chaque individu. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle l'intensité d'exercice est couramment exprimée en pourcentage de paramètres individuels chez l'homme tels que VO_{2max}, FC_{max} ou vitesse maximale (Gaskill *et al.*, 2001; Nummela *et al.*, 2007). Ainsi, les exercices d'entraînement des chevaux trotteurs, précédemment identifiés, nécessiteront d'être individualisés en fonction des capacités individuelles des chevaux. ***Il est alors nécessaire d'objectiver et de rationaliser l'intensité des exercices utilisés dans l'entraînement en fonction d'un paramètre individuel tel que la vitesse maximale, paramètre qui semble pratique et facilement mesurable en toutes conditions chez le cheval.***

La quantification de la dépense énergétique liée à l'exercice est couramment réalisée à partir de la consommation d'oxygène d'effort. La mesure de la consommation d'oxygène semble être la méthode la plus adaptée à l'étude des sollicitations cardiorespiratoires chez le cheval à l'exercice puisqu'elle traduit les adaptations immédiates du système. En conditions de terrain, les méthodes de mesure de la consommation d'oxygène utilisables chez le cheval à l'exercice sont relativement limitées. C'est pourquoi, les recommandations actuelles de Martin-Rosset (2012) proposent d'estimer la dépense énergétique liée à l'activité physique chez le cheval trotteur à partir d'une équation précédemment établie (Gottlieb-Vedi *et al.*, 1991) et ce à partir des phases d'un programme d'entraînement américain proposé par Lovell (1994). Les trois phases composant ce programme sont les phases d'adaptation, de vitesse et de foncier pour lesquelles la dépense énergétique quotidienne liée à l'exercice serait

comprise entre 683 et 1366 kcal (2860 et 5719 kJ respectivement) (Tableau 8). Ces données représentent les seules estimations de dépense énergétique au cours d'exercices spécifiques utilisés dans l'entraînement des chevaux trotteurs et méritent d'être complétées. ***La dépense énergétique liée à l'activité physique nécessite d'être directement quantifiée en conditions de terrain et ce à partir des différent exercices utilisés dans l'entraînement des chevaux trotteurs attelés.*** Ainsi, l'adaptation du système K4b² à l'espèce équine ouvre de nouvelles perspectives pour quantifier la consommation d'oxygène et donc la dépense énergétique des chevaux en conditions réelles d'exercice. Son utilisation a précédemment démontré quelques biais méthodologiques dans la mesure des échanges respiratoires. ***Il est ainsi nécessaire de vérifier la cohérence des données obtenues avec cet analyseur portable et notamment de la consommation d'oxygène afin d'estimer la dépense énergétique liée aux exercices d'entraînement du cheval trotteur attelé.***

Tableau 8. Estimation de la dépense énergétique du cheval trotteur (d'après Martin-Rosset, 2012).

Phases	Durée (semaine)	Dépense énergétique totale [kcal (kJ)]	Dépense énergétique hebdomadaire [kcal (kJ)]	Dépense énergétique quotidienne [kcal (kJ)]
Adaptation	4	19125 (80073)	4781 (20017)	683 (2860)
Foncier	4	21375 (89493)	5344 (22374)	763 (3195)
Vitesse	2	19125 (80073)	9562 (40034)	1366 (5719)

De plus, l'estimation de la consommation d'oxygène et de la dépense énergétique à partir de mesures de fréquence cardiaque semble une approche intéressante en conditions de terrain chez le cheval. Elle permet une estimation de la consommation d'oxygène à partir d'un marqueur facilement mesurable chez le cheval et surtout garantit une estimation de la dépense énergétique si les mesures de consommation d'oxygène s'avèrent incohérentes comparées aux données physiologiques issues de la littérature chez les chevaux trotteurs. Néanmoins, cette méthode nécessite au préalable d'étalonner la régression entre la consommation d'oxygène et la fréquence cardiaque pour chaque individu et ce à partir d'un test incrémental adapté à la discipline. Or, dans le trot attelé, les tests terrain sont principalement de type intermittent avec des temps de récupération élevés entre les paliers (de 1 à 5 min). ***Au regard des connaissances actuelles, il semble important d'établir un test incrémental de terrain spécifique à la discipline du trot attelé permettant d'investiguer en continu la relation individuelle VO_2/FC.*** De plus, compte tenu de l'intérêt particulier de la fréquence cardiaque comme indicateur indirect de VO_2 autant chez l'homme (Erdogan *et al.*, 2010) que chez le cheval (Matsui *et al.*, 2004 ; Coenen, 2010), ***il semble intéressant de quantifier la dépense énergétique à partir des mesures de FC lors d'exercices spécifiques chez le cheval trotteur et de comparer les résultats de cette méthode avec ceux obtenus par mesure directe de VO_2.***

SYNTHESE EXPERIMENTALE

Ce travail de thèse a eu pour principal objectif d'estimer la dépense énergétique liée à l'exercice chez le cheval trotteur attelé à partir des mesures de consommation d'oxygène et de fréquence cardiaque en conditions de terrain. Afin de répondre à cet objectif, nous avons dû réaliser au préalable un ensemble de mises au point méthodologiques. Ainsi, ce travail de thèse s'articule en trois chapitres expérimentaux (Tableau 9) :

- Le ***chapitre expérimental 1*** (Publications 1 et 3) est composé de deux essais conduits au centre d'entraînement de Grosbois (Boisy Saint léger, France). L'essai 1a consiste en une enquête terrain réalisée auprès d'entraîneurs professionnels de chevaux trotteurs afin de décrire les exercices spécifiques utilisés dans l'entraînement des trotteurs. Ces résultats sont valorisés dans la publication 1. L'essai 1b présente la caractérisation de l'intensité des exercices identifiés dans l'enquête en fonction d'un paramètre individuel, la vitesse moyenne et maximale sur 500m. Cette caractérisation permet d'adapter les exercices aux capacités individuelles et donc de soumettre des chevaux maintenus en condition expérimentale contrôlée aux mêmes exercices. Cet essai est valorisé dans la publication 3.

- Le ***chapitre expérimental 2*** (Publication 2) présente un essai visant à étudier les effets de deux protocoles incrémentaux continus sur les réponses cardiorespiratoires et sur la relation entre la consommation d'oxygène et la fréquence cardiaque obtenues avec l'appareil portable K4b² sur les chevaux trotteurs maintenus en condition expérimentale contrôlée. Cet essai est valorisé dans la publication 2.

- Le ***chapitre expérimental 3*** (Publication 3 et Publication courte 4) présente la quantification de la dépense énergétique liée aux exercices spécifiques de la discipline du trot attelé chez des chevaux trotteurs maintenus en condition expérimentale contrôlée. La publication 3 présente la quantification énergétique à partir des mesures de consommation d'oxygène réalisées en conditions de terrain. La publication courte 4 présente une comparaison de méthodes d'estimation de la dépense énergétique liée aux exercices d'entraînement : mesures de consommation d'oxygène *vs.* mesures de fréquence cardiaque et utilisation de la relation individuelle VO_2/FC.

Tableau 9. Descriptif du dispositif expérimental et valorisation des données.

Essais	Objectifs	Chevaux	Schéma expérimental	Mesures réalisées	Valorisation
1 (a et b)	a) Décrire les exercices pratiqués dans l'entraînement des chevaux trotteurs attelés	35 chevaux trotteurs du centre d'entraînement de Grosbois	Enquête terrain : investigation de 20 écuries	Données descriptives des exercices (volume, intensité, fréquence)	Publication 1 (Comparative Exercise Physiology, 2014)
	b) Caractériser les exercices identifiés en % v500	8 chevaux trotteurs du centre de Grosbois	Test d'effort sur 500 m	Mesure de la vitesse moyenne sur 500 m et fréquence cardiaque	Publication 3 (Animal)
2	Mettre au point un test incrémental continu pour déterminer relation VO2/FC	5 chevaux trotteurs expérimentaux	2 protocoles de tests (T1 et T2)	Mesures cardiorespiratoires Lactatémie	Publication 2 (Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition, 2014)
3	Quantifier la dépense énergétique d'exercice via des mesures de consommation d'oxygène	6 chevaux trotteurs expérimentaux	Test v500 + 4 exercices spécifiques pratiqués dans l'entraînement des trotteurs	Mesures cardiorespiratoires Lactatémie Température rectale	Publication 3 (Animal)
4	Comparer deux méthodes d'estimation de la dépense énergétique liée à l'exercice	6 chevaux trotteurs expérimentaux	2 méthodes testées (mesure directe de VO_2 et mesure indirecte à partir de la relation individuelle VO_2/FC)	Mesures cardiorespiratoires Lactatémie Température rectale	Publication courte 4 (Journal of Animal Science)

La méthodologie générale

1.1 Les animaux et leur conduite

1.1.1 Les chevaux trotteurs du centre d'entraînement de Grosbois

Les essais 1a et 1b ont été conduits au centre d'entraînement de Grosbois (Boisy Saint Lèger, France). Ce centre est actuellement le premier site européen exclusivement dédié à l'entraînement des chevaux trotteurs.

Les chevaux trotteurs

Les chevaux étaient tous de race Trotteur Français. Au cours de l'essai 1a, 35 trotteurs entraînés au centre de Grosbois ont participé à l'enquête. Les caractéristiques des chevaux sont détaillées dans le Tableau 10. Au cours de l'essai, le poids estimé des chevaux par les entraîneurs était de 424 ± 55 et 491 ± 61 kg pour les chevaux non qualifiés (UT) et qualifiés (QT) respectivement. Leur note d'état corporel (NEC) a été établie selon l'échelle proposée par l'INRA (INRA-HN-IE, 1997) par le même enquêteur. Elle a été évaluée à 2,9 ± 0,7 et 2,9 ± 0,3 pour les UT et QT respectivement.

L'essai 1b a été mené sur 8 chevaux trotteurs de Grosbois, trois non qualifiés et cinq qualifiés (Tableau 10). Les chevaux ont été choisis par les entraîneurs ayant accepté de participer à cette étude.

Tableau 10. Caractéristiques des chevaux trotteurs de Grosbois lors des essais 1a et 1b.

		Essai 1a		**Essai 1b**	
		Chevaux non qualifiés	Chevaux qualifiés	Chevaux non qualifiés	Chevaux qualifiés
Nombre de chevaux		17	18	3	5
Age (années)		2,9 ± 0,7	5,3 ± 1,7	2,7 ± 0,6	6,0 ± 1,2
Sexe	-Femelles	6	6	2	0
	-Mâles	6	4	1	0
	-Hongres	5	8	0	5

Les écuries

Les écuries et les entraîneurs ont été présélectionnés à partir des performances des entraîneurs c'est-à-dire du nombre de victoires obtenues en course. Sur place, la disponibilité des entraîneurs a quelque peu modifié la présélection. Nous avons ainsi étendu notre échantillon d'entraîneurs afin d'obtenir 20 entretiens pour l'essai 1a et un maximum de chevaux pour l'essai 1b.

Le logement des chevaux

Les chevaux étaient tous conduits en box individuel, principalement sur litière à base de paille de blé (16 entraîneurs) et plus rarement sur litière artificielle à base de copeaux de bois (4 entraîneurs). L'eau était distribuée à volonté soit par des abreuvoirs automatiques soit par des seaux régulièrement remplis. Les chevaux avaient accès à des paddocks ensablés environ 3,3 ± 1,9 fois par semaine, soit une durée hebdomadaire estimée par les entraîneurs à 153 ± 56 min. Les chevaux n'avaient pas accès à des paddocks enherbés.

L'alimentation des chevaux

L'alimentation était composée de fourrage complété par des aliments concentrés. Tous les entraîneurs offraient du foin à leurs chevaux, principalement un foin de prairie naturelle de France (16 entraîneurs). Trois entraîneurs proposaient deux différents foins, soit deux foins de prairie (2 entraîneurs) soit du foin de prairie naturelle plus du foin de luzerne (1 entraîneur). Le foin était distribué en 2 ou 3 repas par jour. Quatorze entraîneurs limitaient la quantité de foin par jour alors que les 6 autres offraient du foin à volonté. Les quantités distribuées ont été estimées à 6,6 ± 1,9 kg MS (matière de sèche) pour la distribution limitée et à 10 kg MS pour une distribution à volonté.

Les aliments concentrés étaient majoritairement des aliments du commerce (16 entraîneurs) ou un mélange aliment du commerce et avoine (4 entraîneurs). Ils étaient distribués en 3 (19 entraîneurs) ou 4 repas par jour (1 entraîneur). Le volume estimé d'aliment concentré distribué par jour était de 11 ± 2 l soit 5,6 ± 0,8 kg de MS.

L'entraînement des chevaux

La description de l'entraînement des chevaux de Grosbois a fait l'objet d'une partie de ce travail de thèse et sera présenté ultérieurement dans le chapitre expérimental 1.

1.1.2 Les chevaux trotteurs en situation expérimentale contrôlée

Les chevaux trotteurs

Six chevaux hongres de race Trotteur Français (nommés A, B, C, D, E et F), appartenant à l'équipe de recherche d'AgroSup Dijon, ont participé aux essais 3 et 4 et cinq d'entre eux à l'essai 2 (tous sauf F, acquis l'année suivante). Le Tableau 11 présente l'ensemble de leurs caractéristiques. Les chevaux étaient à jour de leur vaccin contre la grippe et le tétanos (ProteqFlu-TE, Merial, Lyon, France) et ont été vermifugés avant le début des essais (Equest gel, Fort Dodge Santé Animale, Tours, France) selon un protocole établi par le vétérinaire traitant. L'état de leur table dentaire a été contrôlé en début d'expérimentation par le vétérinaire traitant et ils ont été auscultés par un ostéopathe équin. Pendant

toute la période des essais, les chevaux ont été pesés (PM 700, Chauny, France) et leur NEC a été établie selon l'échelle proposée par l'INRA-HN-IE (1997) une fois par semaine et avant chaque test.
Les trotteurs A et B ont été précédemment qualifiés dans l'année de leurs 2 ans et ont couru l'année de leurs 3 ans, avant d'être achetés par l'équipe de recherche dès leur réforme. Le cheval C a été présenté 3 fois à une épreuve qualificative qu'il n'a jamais remportée alors que les chevaux D, E et F n'ont jamais été soumis à une épreuve qualificative.

Tableau 11. Caractéristiques biométriques des chevaux en situation expérimentale contrôlée lors des essais 2, 3 et 4.

	Essai 2			**Essais 3 et 4**		
Chevaux trotteurs	Age (années)	Poids (kg)	NEC	Age (années)	Poids (kg)	NEC
A	9	487	3,5	10	487	3
B	9	462	3	10	458	3
C	7	465	3,25	8	458	3
D	6	419	3	7	459	3
E	6	536	4	7	522	3
F				5	482	3
Moyennes ± ET	7,4±1,5	474±43	3,3±0,3	7,8±1,9	478±25	3,0±0,0

ET : écart-types

Le logement des chevaux trotteurs

Pendant les essais 2, 3 et 4, les chevaux trotteurs ont été placés dans une écurie située à Vénarey-les-Laumes. Cette écurie est une écurie d'entraînement de trot attelé qui a pour vocation de faire naître et de valoriser les chevaux trotteurs en course. Elle est équipée d'une vingtaine de box avec abreuvoirs automatiques et de paddocks. Au cours des essais, les chevaux étaient conduits en box individuel (13 m²) sur litière de paille de blé. Ils ont eu accès à un paddock enherbé et/ou sablé quotidiennement, environ 1 h par jour excepté le dimanche.

L'alimentation des chevaux

Pendant toute la durée des essais 2, 3 et 4, les trotteurs ont eu libre accès à l'eau potable et à un bloc de sel dans leur box. Ils ont reçu une ration à base de foin de prairie naturelle, représentant environ 60 % des apports journaliers en matière sèche (1200 g MS/100 kg PV) et d'aliment concentré sous forme de granulé (800 g MS/100 kg PV) (DP Puissance, In Vivo NSA, 71500 Louhans, France) (Tableau 12). Le foin et le granulé étaient distribués en deux repas égaux à 10h00 et 17h00 pour le foin et 08h00 et

17h30 pour le granulé. Les quantités de concentrés ont été calculées en fonction des apports de foin et de façon à couvrir les besoins théoriques estimés à partir du poids des chevaux en début d'expérimentation (Martin-Rosset *et al.*, 1984). Elles ont été ensuite ajustées afin de maintenir constants le poids et l'état corporel des chevaux au cours des périodes d'entraînement.

Tableau 12. Composition biochimique de l'aliment DP Puissance distribué aux trotteurs en situation expérimentale contrôlée.

Constituant analytique (% de kg de MB)		**Additifs au kg**		**Oligo-éléments**		**Valeurs nutritionnelles**
Protéine brute	12,5 %	Vit A	12000 u.i	Manganèse	60 mg	UFC : 0,8
Matière grasse brute	3,5 %	Vit D3	1800 u.i	Cuivre	18 mg	MADC : 105
Cendre brut	7,5 %	Vit E	240 u.i	Fer	108 mg	
Humidité	12 %	Vit B1	6 mg	Zinc	90 mg	
Cellulose brute	15 %	Vit B2	4,8 mg	Iode	0,48 mg	
Calcium	11 g	Vit B5	12 mg	Sélénium	0,36 mg	
Phosphore	5 g	Vit B6	4,8 mg	Cobalt	1,44 mg	
Lysine	0,52 %	Vit PP	24 mg			
Méthionine + cystine	0,42 %	Acide folique	0,48 mg			
		Biotine	0,06 mg			
		Vit K3	2,4 mg			
		Vit B12	0,07 mg			
		Choline	240 mg			

u.i : unité internationale ; UFC : Unité Fourragère Cheval ; MADC : Matière Azotée Digestible Cheval

L'entraînement des chevaux

Les périodes expérimentales se sont déroulées d'avril à juillet 2012 pour l'essai 2 (année 1) et d'avril à juillet 2013 pour les essais 3 et 4 (année 2). Ces deux périodes expérimentales ont systématiquement débuté par une phase de remise en condition d'environ 8 semaines. Pendant cette phase, les chevaux marchaient sur tapis roulant (Horse-Gym 2000 GmbH, Harburg-Großsorheim, Allemagne) pendant 24 ou 32 min à 0 ou 2 % d'inclinaison à 2,2 m/s (7,9 km/h) deux fois par semaine. Ils étaient également attelés deux fois par semaine (soit 2 heures/semaine) sur une piste d'entraînement sablée de 1150 m, suivant un programme d'entraînement qui alternait les exercices identifiés au centre d'entraînement de Grosbois. L'intensité et le volume des exercices ont été adaptés aux capacités de nos chevaux trotteurs

(Tableau 13). La fréquence hebdomadaire des exercices, limitée à deux séances attelées par semaine, a été conclue avec les entraîneurs de Vénarey les Laumes suivant leur disponibilité.

Tableau 13. Exemple d'une semaine type d'entraînement réalisée par les chevaux trotteurs maintenus en condition expérimentale contrôlée.

Jour de la semaine	**Exercices d'entraînement**	
Lundi	***Tapis roulant***	
	Inclinaison (%)	0
	Durée (min)	32
	Vitesse [m/s (km/h])	2,2 (8)
Mardi	***Exercice sur piste***	
	<u>Echauffement :</u>	
	Distance (m)	2000
	Vitesse [m/s (km/h])	5,6 (20)
	<u>Exercice :</u>	
	Distance (m)	3500
	Vitesse [m/s (km/h])	7,5 (27)
	<u>Récupération :</u>	
	Distance (m)	2000
	Vitesse [m/s (km/h])	4,2 (15)
Mercredi		Repos
Jeudi	***Exercice sur piste***	
	<u>Echauffement :</u>	
	Distance (m)	3000
	Vitesse [m/s (km/h])	5,0 (18)
	<u>Exercice :</u>	
	Distance (m)	3 x (1000m)
	Vitesse [m/s (km/h])	9,7 (35) / 10,3 (27) / 10,3 (27)
	Récupération au pas entre les séries (s)	90
	<u>Récupération :</u>	
	Distance (m)	2000
	Vitesse [m/s (km/h])	4,2 (15)
Vendredi	***Tapis roulant***	
	Inclinaison (%)	2
	Durée (min)	24
	Vitesse [m/s (km/h])	2,2 (7,9)
Samedi	***Repos***	
Dimanche	***Repos***	

1.2 Les tests d'efforts

Les tests d'efforts utilisés au cours des quatre essais (Tableau 14) ont été réalisés en conditions de terrain sur pistes d'entraînement ensablées. La piste de Vénarey les Laumes mesurait 1125 m et les deux pistes de Grosbois 1000 et 1500 m. L'essai 1b a été mené par les différents drivers de Grosbois participants à l'étude. Les essais 2, 3 et 4 ont tous été réalisés à l'écurie de Vénarey les Laumes par le même driver. Les différents tests ont suivi un protocole standardisé afin d'évaluer des données physiologiques et mécaniques des chevaux. Les conditions environnementales (température et hygrométrie) ont été contrôlées afin d'éviter les conditions météorologiques extrêmes.

Tableau 14. Descriptif des tests utilisés au cours des quatre essais.

Essais	Tests utilisés au cours des essais
1a	Aucun (Enquête terrain)
1b	Test v500
2	Tests incrémentaux continus : T1 et T2
3	Test v500 Exercices d'entraînement : promenade, jogging, parcours et interval
4	Test incrémental continu : T1 Exercices d'entraînement : promenade, jogging, parcours et interval

1.2.1 Les tests incrémentaux continus

Au cours de l'essai 2, les cinq chevaux trotteurs maintenus en situation expérimentale ont été soumis à deux tests incrémentaux continus (T1 et T2). La vitesse initiale, les incréments de vitesse ainsi que la durée des paliers variaient entre les deux protocoles. Les deux tests débutaient sans échauffement et se terminaient lorsque les chevaux ne pouvaient plus maintenir la vitesse imposée ou lorsqu'ils commettaient une faute *i.e.* passage au galop ou tout autre allure que le trot. Au cours de l'essai 4, les six chevaux trotteurs maintenus en condition expérimentale ont été soumis au test incrémental précédemment choisi lors de l'essai 2, c'est-à-dire T1 qui permettait d'obtenir une relation VO_2/FC plus robuste.

1.2.2 Les tests v500

Lors des essais 1b et 3, les chevaux ont été soumis à un test v500 visant à déterminer leur vitesse maximale de course sur 500 m. Pour les chevaux de Grosbois (essai 1b), l'allure de l'échauffement était laissée au choix de chaque entraîneur, préférant conserver sa routine d'entraînement. Pour les chevaux maintenus en situation expérimentale contrôlée (essai 3), le test débutait par un échauffement standardisé de 3000 m à 5,6 m/s (20,2 km/h). Ensuite, les chevaux devaient parcourir 3 fois 500 m à la vitesse la plus élevée possible, chaque 500 m étant entrecoupé d'une récupération active de même distance à 5,6 –6,9 m/s (20,2 - 24,8 km/h). La meilleure performance des 3 fois 500 m était retenue comme v500 du cheval. Pour cela, les pistes de Grosbois et de Vénarey les Laumes étaient équipées de repères tous les 500m. Ainsi, les temps de chaque 500 m étaient chronométrés par l'expérimentateur et par le driver simultanément (ONstart 300, Geonaute), permettant de vérifier les données pour chaque cheval et de calculer la v500.

1.2.3 Les tests promenade, jogging, parcours et interval

Au cours de l'essai 1a, quatre principaux exercices utilisés dans l'entraînement des chevaux trotteurs ont été identifiés. Ces exercices présentaient des caractéristiques différentes en fonction de l'âge et du stade d'entraînement des chevaux : non qualifiés et qualifiés. Les chevaux trotteurs maintenus en condition expérimentale contrôlée ont alors été soumis aux quatre mêmes exercices (essai 3) que nous avions identifiés pour les chevaux qualifiés dans l'ordre suivant : parcours, interval, jogging et promenade. Afin de tenir compte des différences entre les deux populations, certaines caractéristiques des exercices ont été adaptées aux capacités individuelles. La durée du jogging a été fixée au minimum (30 min) et l'échauffement du parcours et de l'interval a été réalisé en un seul 'heat'. La description des exercices a fait l'objet de l'étude 1a et sera ainsi présenté dans le chapitre expérimental 1.

1.3 Les mesures et les calculs

1.3.1 Les données de vitesses

Les mesures de vitesses ont été réalisées au moyen d'un chronomètre (ONstart 300, Geonaute) et d'un compte tour (Compteur DC 4-S, T'TWIN) fixé sur la roue du sulky.

Lors des essais 1b et 3, la vitesse moyenne et maximale sur 500 m a été déterminée, après avoir chronométré la durée pour réaliser 500 m. Lors de l'essai 2, la vitesse obtenue en fin de test (vVO_{2pic}) a été mesurée et comparée au cours de deux tests incrémentaux continus T1 et T2. La vVO_{2pic} était retenue comme la vitesse la plus élevée ayant été soutenue lors du dernier palier complètement effectué (Gerbeaux *et al.*, 1991 ; Berthoin *et al.*, 1994). Pour déterminer la vVO_{2pic} des chevaux lors de l'essai 4, le test T1 a été utilisé.

1.3.2 Les données cardiorespiratoires

Toutes les mesures cardiorespiratoires (essais 2, 3 et 4) ont débuté par un enregistrement repos de 2 min avant test où les chevaux étaient maintenus à l'arrêt sans bouger dans la zone de préparation.

La fréquence cardiaque

L'enregistrement de la FC a été réalisé simultanément aux mesures respiratoires par l'intermédiaire du K4b² équin et d'un cardio fréquencemètre de type RS800CX (Polar Electro, Kempele, Finlande), excepté pour l'essai 1b où les mesures de FC ont été réalisées sans mesure respiratoire. Les enregistrements de FC ont été moyennés toutes les 5 secondes sur l'ensemble des sessions expérimentales. La FC_{pic}, FC moyenne obtenue sur les 30 dernières secondes de l'exercice, a été déterminée pour chaque exercice.

Les échanges respiratoires

Au cours des essais 2, 3 et 4, le système portable d'analyse K4b² équin (Cosmed K4b², Rome, Italie) a été utilisé. L'unité portable et sa batterie (Figure 11) ont été fixées au brancard droit du sulky. L'unité était reliée au cheval par l'intermédiaire de trois tubes capillaires semi-perméables montés en série (Permapure) s'insérant sur le masque facial rigide. A l'extrémité du masque, deux turbines étaient fixées où seule la turbine droite servait dans les mesures. Le flux d'air expiré provoquait la rotation de la turbine, qui grâce à un lecteur optoélectronique, calculait le nombre de rotations de turbine par seconde. Le système mesurait également le flux d'air, calculait le nombre de cycles respiratoires par minute et le débit expiratoire. L'air expiré était conduit depuis le masque par le Permapure qui évacuait l'humidité en excès dans l'unité portable. Un capteur électronique permettait de mesurer la fraction d'O_2 (FeO_2) contenu dans le gaz expiré. La fraction de CO_2 ($FeCO_2$) était aussi évaluée à l'aide d'une électrode infrarouge. Les paramètres mesurés étaient VO_2, VCO_2, V_E, fréquence respiratoire (Fr), QR et FC. L'enregistrement était réalisé en mode cycle par cycle. L'ensemble de nos mesures a été moyenné toutes les 5 secondes puis filtré à 3 points (Duffield *et al.*, 2004). Pour calculer VO_2, le système se basait sur l'équation suivante:

$$VO_2 = V_E (FiO_2 - FeO_2)$$

Où VO_2 : la consommation d'oxygène par minute (l/min). Elle a été rapportée au poids vif des chevaux lors de nos expérimentations et a été exprimée en ml/min/kg, V_E : la ventilation (l/min), FiO_2: la fraction d'O_2 dans l'air inspiré (en %) et FeO_2: la fraction d'O_2 dans l'air expiré (en %).

Figure 11. Utilisation du K4b² équin et de l'Equimask sur un cheval trotteur maintenu en condition expérimentale contrôlée.

Pour obtenir les mesures de volumes (V_E et V_T), les données enregistrées avec l'appareil étaient multipliées par 20, qui correspond au ratio entre les systèmes de mesure du débit humain et équin (Art et al., 2006), comme indiqué par le fabricant Cosmed.

L'appareil était mis en route une heure avant le début de chaque session expérimentale selon les recommandations du fabricant, pour permettre l'atteinte d'une température suffisante pour un fonctionnement correct des analyseurs d'O_2 et de CO_2. L'appareil était calibré avant chaque test et chaque cheval. Chez l'homme, le processus de calibration débute avec une seringue de trois litres permettant de calibrer la vitesse de rotation de la turbine dans le lecteur optoélectronique afin que l'appareil mesure précisément (à 0,0001 litre prêt) le volume expiré. Chez le cheval, cette étape n'existe pas car elle nécessiterait une seringue de volume trop important. Le fabricant précise néanmoins que le système est suffisamment stable pour ne nécessiter un contrôle précis que tous les six mois, période à laquelle le système était envoyé en maintenance chez Cosmed. Ainsi la calibration chez le cheval débutait par une calibration des gaz. Elle s'effectuait avec une bouteille de gaz étalon (15% d'O_2 et 5% de CO_2) pour calibrer les analyseurs d'O_2 et de CO_2. La seconde étape était une calibration du délai, procédure imposée par le logiciel, afin de calibrer le temps nécessaire au flux d'air pour atteindre les analyseurs d'O_2 et de CO_2 en parcourant le trajet qui les relie au masque par l'intermédiaire du Permapure. La dernière étape consistait à calibrer l'air ambiant, elle était réalisée sur le cheval avant le départ du test.

La consommation pic d'oxygène (VO_{2pic}) a été déterminé pour chaque exercice en moyennant les 30 dernières secondes de chaque exercice.

Le seuil des échanges respiratoires

Le seuil a été déterminé visuellement lors de l'essai 2 selon la méthode de Beaver *et al.* (1986) pour chaque cheval. Il a été exprimé en % de $VO_{2pic.}$

La relation VO_2/FC

La relation individuelle entre la VO_2/FC a été réalisée pour chaque cheval au cours des tests incrémentaux continus (essais 2 et 4). Elle a été établie à partir des données de FC et VO_2 (l/min) obtenues au cours de la dernière minute de chaque palier de vitesse (Spurr *et al.*, 1988) afin d'exclure les phases d'adaptations observées lors du changement de vitesse (Evans et Rose, 1988). La relation VO_2/FC a été analysée par un modèle de régression polynomiale en utilisant une procédure statistique standard (Microsoft Excel 2007, Microsoft Corporation, Redmond, Washington) (chapitre expérimental 3, publication courte 4).

1.3.3 Les prélèvements et mesures de lactatémie

Une prise de sang a été réalisée lors des essais 2, 3 et 4 sur les chevaux trotteurs maintenus en conditions contrôlées. Du sang veineux de la veine jugulaire a été prélevé avant (environ 30 min avant le début de l'exercice) et après chaque exercice (moins de 3 min après l'arrêt de l'exercice) pour l'ensemble des essais, exceptés pour le parcours et l'interval où une prise de sang supplémentaire a été réalisée post récupération (moins de 3 min après l'arrêt de la récupération) (Figure 12). Les échantillons de sang ont été collectés par prise de sang dans un tube de 5 ml pré traité au potassium oxalate / fluorure de sodium. Le plasma a été extrait par centrifugation (EBA 20 Hettich Zentrifugen, Tuttlingen, Allemagne) des tubes (450 x G pendant 10 min) avant d'être transféré dans des tubes secs. Tous les tubes ont ensuite été congelés (-20°C) et envoyés par cryoglobe (Cryo Express, Air Liquide, Puteaux, France) au laboratoire Franck Duncombe (Caen, France) pour analyse par méthode colorimétrique enzymatique (kits n° LC 2653, Randox, Crumlin, Angleterre) afin de déterminer les concentrations en lactate dans le sang veineux.

Figure 12. Prélèvement sanguin post effort sur un cheval trotteur maintenu en situation expérimentale contrôlée.

1.3.4 Les mesures de température rectale

Les températures rectales des chevaux maintenus en situation expérimentale contrôlée ont été mesurées au cours des essais 3 et 4. Elles ont été réalisées en même temps que les prises de sang, c'est-à-dire avant (environ 30 min avant le début de l'exercice) et après chaque exercice (moins de 3 min après l'arrêt de l'exercice) pour l'ensemble des essais, excepté pour le parcours et l'interval où une mesure supplémentaire a été réalisée post récupération (moins de 3 min après l'arrêt de la récupération).

1.3.5 Les calculs de dépense énergétique

Pour calculer la dépense énergétique relative à l'exercice et aux différentes phases de chaque exercice (échauffement, exercice et récupération) (essais 3 et 4), la consommation d'oxygène de repos a été soustraite de la consommation d'oxygène d'exercice (Bertuzzi *et al.*, 2013). La VO_2 repos a été calculée en moyennant les 30 dernières secondes de la phase de 2 min de repos avant chaque test (Bertuzzi *et al.*, 2007).

L'équivalent calorique de 20,9 kJ/l d'O_2 a été utilisé pour convertir VO_2 en énergie (Bertuzzi *et al.*, 2007 ; Mello *et al.*, 2009) selon l'équation suivante :

DE (kJ) = nombre de litres d'O_2 consommé x 20,9 (kJ/l)

Lorsque la DE a été calculée à partir de la relation individuelle VO_2/FC (essai 4), les données de FC ont d'abord été moyennées par phase d'exercice avant d'appliquer l'équation individuelle permettant d'obtenir VO_2 théorique en l/min. La VO_2 de repos théorique (l/min) a été calculée à partir des données de FC moyennées sur les 30 dernières secondes de la phase de 2 min de repos avant chaque test et de l'équation VO_2/FC de repos ; puis a été soustraite à la VO_2 théorique d'exercice. La DE d'exercice a donc été calculée selon l'équation :

DE (kJ) = VO_2 théorique d'exercice (l/min) x durée (min) x 20,9 (kJ/l)

Où le nombre de litres d'O_2 consommés par chaque phase d'exercice a été obtenu en multipliant VO_2 théorique (l/min) par la durée en min de chacune des phases d'exercice.

1.4 Le traitement statistique

Avant chaque traitement statistique, la distribution des données a été testée à l'aide d'un test Kolmogorov-Smirnov sous le logiciel Statistica (Version 8.0 ; Statistica, Stat Soft. Inc., Tulsa, USA). Pour l'ensemble des traitements statistiques, le seuil de signification retenu était de 0,95 soit $P < 0,05$. Les tests statistiques réalisés lors des différents essais ont été adaptés aux objectifs et sont présentés dans les chapitres expérimentaux correspondants.

CHAPITRE 1

Description et caractérisation des exercices d'entraînement du cheval trotteur attelé

Afin de compléter les données existantes chez le cheval trotteur, nous avons mené deux essais visant dans un premier temps à effectuer une description détaillée des pratiques et exercices d'entraînement utilisés par les entraîneurs de chevaux trotteurs et dans un second temps à caractériser l'intensité des exercices en fonction des capacités individuelles.

1.1 La description des pratiques d'entraînement

L'objectif de ce travail était de décrire les pratiques et les exercices spécifiques utilisés dans l'entraînement des chevaux trotteurs en France. Les spécificités d'entraînement ont été détaillées pour deux populations de chevaux de niveaux et d'âge différents, les chevaux non qualifiés et qualifiés. Vingt entraîneurs situés sur le site de Grosbois pendant le Meeting d'hiver 2011-2012 ont participé à cet essai. Ils ont été soumis à des entretiens individuels au cours desquels des questionnaires étaient remplis (Annexe 1). Le questionnaire sur les pratiques d'entraînement était divisé en trois parties avec des questions ouvertes et fermées à choix multiples. La première partie était basée sur des informations générales sur l'entraîneur : par exemple, depuis combien de temps il entraîne à titre professionnel, combien de chevaux il entraîne en moyenne par an. La seconde partie concernait des informations sur le programme d'entraînement et l'organisation des courses. Et enfin une troisième investiguait le programme hebdomadaire d'entraînement et sa composition détaillée avec une description systématique de chaque exercice. Pour cela, il était demandé aux entraîneurs de choisir deux chevaux types dans leur écurie : un trotteur non qualifié et un trotteur qualifié.

1.2 La caractérisation des exercices d'entraînement

L'objectif de cet essai était de caractériser l'intensité des exercices identifiés dans l'enquête en pourcentage d'un paramètre individuel. Pour cela nous avons mesuré la v500 de chevaux à Grosbois puis caractérisé l'intensité des exercices en pourcentage de la v500.

1.3 Les résultats et discussion

1.3.1 Les pratiques et exercices d'entraînement

Ce travail a été valorisé sous la forme d'une publication paru dans *Comparative Exercise Physiology*, le 18 novembre 2013.

Publication 1

Training management of Standardbred trotters: a field survey in France

J Fortier, V Julliand, P Harris and AG Goachet

Comparative Exercise Physiology 2014, 10 (1): 63-71

Comparative Exercise Physiology, 2014; 10 (1): 63-71

Wageningen Academic Publishers

Training management of Standardbred trotters: a field survey in France

J. Fortier[1], V. Julliand[1], P. Harris[2] and A.G. Goachet[1]

[1]URAN E, AgroSup Dijon, 26 bd Dr. Petitjean, BP 87999, 21079 Dijon cedex, France; [2]Equine Studies Group, WALTHAM Centre for Pet Nutrition, Waltham on the Wolds LE14 4RT, United Kingdom; j.fortier@agrosupdijon.fr

Received: 17 October 2013 / Accepted: 18 November 2013
© 2014 Wageningen Academic Publishers

RESEARCH ARTICLE

Abstract

This study aimed to characterise the training practices of French trainers and to describe the training load undertaken by unqualified (UT) and qualified Standardbred trotters (QT). During the Paris-Vincennes 2012 meeting, 20 trainers from the Grosbois training centre were surveyed. Details of their general training practices as well as the weekly workloads for UT and QT were obtained. A nonparametric Mann-Whitney test was used to compare the UT and QT data and a principal component analysis (PCA) was carried out to examine links between trainer characteristics and particular training practices. Four main exercises used to train trotters were identified: (1) 'promenade' exercise: light exercise at walk and at slow trot (5.1±0.4 m/s) lasting 48±9 min; (2) 'jogging': moderate trot exercise (6.9±1.5 m/s) lasting 44±12 min; (3) 'parcours' exercise: moderate/high intensity trot session (10.3±0.9 m/s) over 2,844±1,412 meters with a final sprint; (4) 'interval' type exercise: fast trot sessions (10.8±0.9 m/s) over 1,010±212 meters with sprint phases. Trainers used a combination of these four exercises to train both UT and QT. Moreover, the estimated training weekly workload did not appear to differ between the two age categories, with apparently similar exercises and training loads being used to train both UT and QT. The results of the PCA suggested that as trainers become older and more successful they tend to change the composition of exercises used. They preferably used more 'jogging' type exercise, regardless of the horses' age or training level. Whilst the weekly training plan varied between trainers, it seems that the individual trainer's annual programme was relatively constant, consisting of a repetition of a typical training week.

Keywords: conditioning, exercise, practices, racehorses, trainer

1. Introduction

The gold standard in sport physiology is to determine how the body responds to chronic repetition of an exercise, which improves the athlete's performance with minimal risk of injury, and provides the appropriate behavioural and psychological factors for performance (Hinchcliff and Geor, 2008). In human physical activities, some fundamental principles are applied to guide training in order to achieve optimal physiological adaptations (Wilmore *et al.*, 2009). These include the progressive increase of workload, utilising an increase of the volume (i.e. the total quantity of activity performed, currently expressed as duration, distance or the number of repetitions of an exercise) and/or the intensity of training (i.e. the qualitative component of work defined in relation to power output (work per unit of time) or velocity) (Viru and Viru, 2000). Monitoring and control of the physiological stress imposed on athletes, by any workload, through a valid measure of the training load (Foster *et al.*, 1995) is also commonly used. Consequently, the art of training involves the judicious use of exercises of varying intensities and durations (Baker *et al.*, 1994; Evans *et al.*, 1995) in order to ensure that each individual athlete receives the appropriate and adequate training stimulus to enable optimal physiological adaptations for their sport. In addition, to key factors such as work intensity and duration, the physiological status can influence the internal training load (Armstrong and Welsman, 2000). Although multiple differences exist between the exercise physiology of horses and humans (Art, 2011), some training principles could potentially be transferred to horses from humans.

ISSN 1755-2540 print, ISSN 1755-2559 online, DOI 10.3920/CEP13035

However, to some extent any in-depth discussion of equine exercise physiology, and its effect on fitness and performance, is limited by the lack of published field data on training techniques and lack of an effective measure of training load. Based on what is already well known in human sport sciences, it appears that bridging this gap, by expanding our knowledge of current training practices in the field, would be of great interest and could potentially help improve the way we train competitive horses, such as Standardbred trotters. Recently the training practices of a successful trainer in Germany have been reported (Wegener *et al.*, 2012). These authors described how this trainer used three different exercises to train his 2-, 3- and 4-year-old horses and how the relative proportion of each exercise depended on the horse's age. For example, the tempo exercise (a moderate trot session with one sprint phase) was used almost exclusively to train the 2-year-olds and this age group was also exercised at a lower speed and over a shorter distance than the 4-year-olds during the two sprint phases of the speed type exercise. However, there is little published information available for Standardbred trotters in France. Therefore, the objectives of this current investigation were to characterise how Standardbred trotters were managed at one racing track in France and to evaluate if the training load varied according to the age of the horse. To that purpose, two populations were studied: unqualified and qualified elite Standardbred trotters.

2. Material and methods

Trainers

The target population for this study was professional trainers located at the Grosbois training centre (Boissy St. Lèger, France) during the Meeting of Paris-Vincennes 2011-2012. The Grosbois training centre is a private centre managed by the national association Le Cheval Français. The survey was conducted over two weeks and the sample population was limited to twenty trainers in order to allow the same interviewer to survey all the trainers within this time frame. The survey was conducted as a face-to-face interview in order to increase participation and facilitate understanding. Each interview lasted approximately 60 to 90 min and was based on a standardised questionnaire. This questionnaire was divided into three parts with open and closed multiple-choice questions. The first part focused on the trainer and enabled general details to be obtained; for example, how long they had been a trainer and how many trotters they trained. Questions in the second part investigated in more detail their training programme, for example, the annual training programme and how the schedules of races are organised. In the final section, more in-depth data were collected for both the unqualified trotters (UT), i.e. trotters in preparation for a qualifying test, as well as the qualified elite trotters (QT), i.e. trotters that have won a qualifying test and therefore have the right to race. For each category, the trainers chose representative examples from their horses and detailed their individual weekly training programmes including the different types of exercise used, their duration and speed, as well as information regarding the warm-up and recovery periods.

Data collection and statistical analysis

The estimated speed (obtained through GPS during training sessions attached to the sulky), duration and the weekly workload provided by the trainers were averaged and reported as means ± standard deviation. The trainer's verbal responses to the questions were directly recorded and then transferred onto a PC into Le Sphinx Plus² (version 4.5; Le Sphinx Développement, Chavanod, France) for data manipulation. The more detailed individual information dataset was divided according to whether the information was for UT or QT horses and a non-parametric Mann-Whitney test was then used to compare this data. The level of significance of 5% ($P<0.05$) was adopted.

Subsequently, a principal component analysis (PCA) was carried out using the 'FactoMineR' package in R-software (Husson *et al.*, 2008) utilising the main trainer characteristics and weekly workload of UT and QT. Parameters included in the analysis were the age, the experience and the number of wins (victory) of the trainers and the weekly frequencies of each type of exercises undertaken ('promenade', 'jogging', 'parcours' and 'interval' type exercises) for UT and QT. The individuals' factor map was then performed which separated the trainers into groups according to their training practices and the Pearson correlations (R_s) were tested with a level of significance accepted at a P-value <0.05.

3. Results

Trainers

Of the 20 trainers surveyed, two did not want to complete part 3 of the questionnaire, resulting in a response rate of 100% for parts 1 and 2, and 90% for part 3. The characteristics of the trainers are summarised in Table 1. All trainers were professional while 85% of them had a public license, i.e. trainers with professional training who are entitled to race their own as well as horses belonging to others. The rest (15%) had a private license, i.e. they are employed by a professional trainer to race horses or an owner with authorisation to train only his horses. 25% had been professional race-trainers for over 20 years, 20% between 10-20 years, 25% between 5-10 years and 30% had only been professional trainers for less than 5 years. Overall the mean length of time training for the private trainers was 16±10 years vs. 14±12 years for the public trainers. How successful the trainers were, defined by the total number of races won in their career and the number of races won in 2012, is presented in Table 1.

General training management

The number of horses trained and their ages during 2011 are shown in Table 2. Unqualified trotters (≤3-year-olds) were overrepresented compared with 4- and 5-year-olds trotters. The qualification test for young Standardbred race horses (i.e. the first step required before any horse is allowed to race) was carried out when they were 2-year-olds from May until December by 75% of trainers. The remainder (25%) qualified their horses as 3-year-olds at the beginning of the year from January until April. In general, trainers decided on which races to run their horses according to the age and sex of the horse as well as the prize money. Thereby, the weekly workload was relatively constant and repetitive throughout the racing season, explaining few annual variations in the training plan. Once qualified, horses undertook an average of 2±0.6 races per month. The majority (90%) of trainers gave their qualified horses one or more 'rest periods' (i.e. periods without work) during the year, depending on their perception of the horses 'state of fatigue'. 73% of these trainers 'put their qualified horses out to pasture' for 15-21 days during the year in order to provide a complete break from being exercised. The others (27%) continued to work the horse, but at a reduced workload ('walking' and 'jogging') during their break.

Weekly training programmes

In-depth, weekly training programmes were provided based on a typical training week with a race on the Sunday. Generally, trainers rested their horses the day after racing. During the training week, horses were exercised every day using a mix of five different types of exercise: (1) 'promenade' exercise: light exercise at walk and a slow trot undertaken off the track and on bridleways on the woods; (2) 'jogging': moderate trot exercise on the woods or on bridleways; (3) 'parcours' exercise: moderate intensity trot session undertaken on the racetrack over a similar distance to races with a final sprint over the last 500 meters; (4) 'interval' type exercise: fast trot sessions with sprint phases undertaken on the racetrack; and (5) 'paddock': free exercise out on sandy paddock. The main characteristics of these different types of exercises are summarised in Figures 1, 2 and 3 and are discussed in more detail below.

Promenade

The 'promenade' ranged between 5.0 and 6.4 m/s for between 30 to 60 min. Estimated mean intensity and duration of the 'promenade' exercise did not differ between UT and QT. There was a trend (P=0.08) for QT to undertake more 'promenade' exercise per week than the UT (1.9±1.6 vs. 1.0±1.0 times/week, respectively).

Table 1. Characteristics of trainers surveyed according to their status.

Status[1]	Private trainers	Public trainers
Numbers of trainers	3	17
Age (years)	54±14	40±11
Experience (years)	16±10	14±12
Total of races won	749±870	191±243
Races won in 2012	27±25	16±21

[1] Mean ± standard deviation for numbers of trainers, age, experience and success (number of races won during their career and during 2012) according to their status.

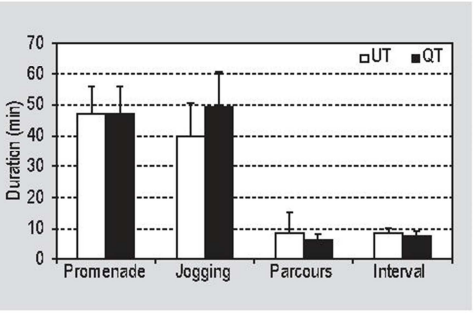

Figure 1. Duration (mean ± standard deviation) of the four different exercise types for unqualified (UT) and qualified trotters (QT) according to trainers' estimates. No significant difference was observed between UT and QT (P>0.05).

Table 2. Mean number (± standard deviation) of trotters per stable in 2011 by their age according to trainers' estimates.

Age	<2-year olds	2-year olds	3-year olds	4-year olds	5- to 9-year olds
Number of trotters	8.7±13.4	7.7±10.7	9.1±13.5	5.1±7.8	9.3±13.3
Range[1]	0-45	0-40	0-60	0-35	0-55

[1] Range in 20 trainers surveyed.

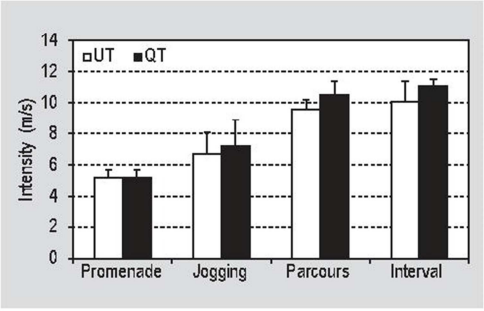

Figure 2. Speeds (mean ± standard deviation) of the of the four different exercise types for unqualified (UT) and qualified trotters (QT) according to trainers' estimates. No significant difference was observed between UT and QT (*P*>0.05).

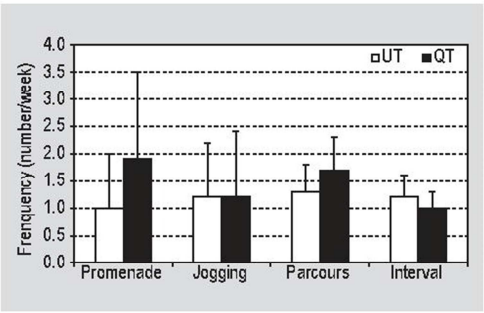

Figure 3. Weekly frequencies (mean ± standard deviation) of the four different exercise types for unqualified (UT) and qualified trotters (QT) according to trainers' estimates. No significant difference was observed between UT and QT (*P*>0.05).

Jogging

The 'jogging' ranged between 5.0 and 9.0 m/s for between 30 to 60 min. The estimated speed of the 'jogging' exercise did not differ significantly between UT and QT (6.7±1.4 vs. 7.2±1.7 m/s, respectively). The time spent 'jogging' was not different between UT and QT (40±11 vs. 49±11 min, respectively). Per week, trainers organised 1.19±1.05 and 1.18±1.19 'jogging' exercise sessions for UT and QT, respectively.

Parcours and interval exercises

Trainers considered the 'parcours' and 'interval' type exercise as 'real work'. The majority of trainers (65% and 70% of trainers for UT and QT, respectively) carried out two of these work sessions per week, each separated by two days, and the remainder (35% and 30% of trainers for UT and QT, respectively) carried out three of these work sessions per week, each separated by one day. Both 'parcours' and 'interval' type exercises were preceded by a warm up and followed by a recovery period. No significant difference was found between UT and QT regarding the warm up and the recovery periods (Table 3). 27.8% of trainers began to warm up their trotters on a horse walker for approximately 20 min, and then on the racetrack once the trotters were harnessed or saddled. For 50% of trainers for UT and 44% of trainers for QT, the warm up on the track, composed of bouts called heats, included either one (50% of trainers for UT and 44% of trainers for QT) or two heats (12.5% of trainers for UT and 31% of trainers for QT). When two heats were undertaken, the first one was done at a slower speed than the second one (6.8±1.1 vs. 10.1±0.7 m/s for heat 1 and heat 2, respectively). The first heat was also undertaken over a longer distance compared with the second heat (4,020±1,683 vs. 2,471±709 m for heat 1 and heat 2, respectively). The recovery period was carried out on the racetrack at 5.5±1.6 m/s over 2,343±617 m.

The mean speed of 'parcours' undertaken did not differ between QT and UT (10.5±0.9 vs. 9.7±0.6 m/s, respectively). The mean distance run during 'parcours' exercise trend to be higher (*P*=0.07) for QT than UT (2,973±1,223 and 2,683±1,750 m, respectively). The 'parcours' exercise was repeated 1.8±0.7 for UT and 1.4±0.5 times per day for QT with one final sprint phase. The weekly frequency of

Table 3. Characteristics of the warm up and recovery periods for unqualified trotters (UT) and qualified trotters (QT) used during 'parcours' and 'interval' exercises according to trainers' estimates.[1]

	1st heat		2nd heat		Recovery	
	UT	QT	UT	QT	UT	QT
Speed (m/s)	6.7±1.1	6.8±1.2	10.4±0.9	9.9±0.6	5.6±1.5	5.4±1.7
Distance (m)	3,973±1,476	4,057±1,885	2,200±283	2,580±826	2,283±512	2,387±718
Sprint phase	no	no	yes	yes	no	no

[1] No significant difference was observed between UT and QT for all parameters (*P*>0.05).

'parcours' exercise tended (P=0.07) to be higher for QT compared to UT (1.7±0.6 and 1.3±0.5, respectively).

The 'interval' type exercise was composed of 5 repetitions of 1,071±236 meters at ~10 m/s for UT. For QT, it comprised 5.6 repetitions over 907±117 meters at ~11 m/s. The distance tended (P=0.07) to be higher for UT compared to QT. The weekly frequency of the 'interval' type exercise did not differ between UT and QT (1.2±0.4 vs. 1.0±0.3 times per week, respectively).

Paddock

The weekly time allowed for free exercise at the paddock did not differ between UT and QT (2 h 53 ± 1 h vs. 2 h 16 ± 47 min, respectively) nor did the weekly frequency (3.4±1.7 vs. 3.2±2.1 times for UT and QT, respectively).

Explanatory factors of training management

The main planes of the variables factor map (Figure 4A), defined by axes 1 and 2, represented nearly 60% of the data variability. The variables 'victory', 'weekly number of jogging type exercises for QT' and 'weekly number of jogging type exercises for UT' predominantly contributed to the construction of axis 1. Axis 2 was mainly represented by the variables 'weekly number of promenade of UT', 'weekly number of promenade of QT', 'experience of trainer' and 'age of trainer'. Regarding the correlation circle (Figure 4A) variables 'number of weekly parcours or interval exercises for UT' and 'number of weekly parcours or interval exercises for QT' were poorly represented. The experience and age of trainers were not perhaps surprisingly significantly and positively correlated (R_s=0.85, P<0.01) as shown in Table 4. The number of wins per trainer was significantly and positively correlated to 'the weekly number of jogging type exercise for QT' (R_s=0.75, P<0.01) (Table 4). 'The weekly number of promenade type exercises for QT' was significantly and positively correlated to 'the weekly number of promenade for UT' (R_s=0.63, P<0.05) (Table 4). 'The weekly number of promenade exercise for UT' tended to be significantly and positively correlated to 'the weekly number of promenade for QT' (R_s=0.63, P=0.08). The individuals factor map (Figure 4B) represents the trainers according to their training practices. As indicated by circles on the Figure 4B, some trainers seemed to have very similar practices. Group 1 represented by trainers E-B-S, with a mean age of 38 years and an average number of 350 races won, utilised two weekly 'jogging' and two weekly 'parcours' or 'interval' type exercises for UT and QT. Group 2, composed of trainers aged on average 31 years, utilised predominantly 'promenade' and 'parcours' or 'interval' type exercises in the typical week, without 'jogging' exercise.

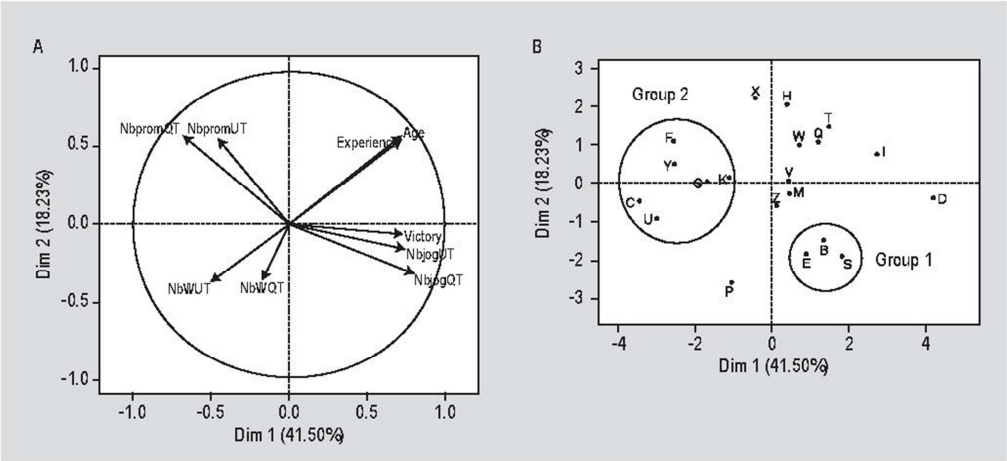

Figure 4. Results Principal component analysis. (A) Variables and (B) individuals factor maps correlation between trainers' characteristics and training practices for twenty trainers surveyed (represented by a letter on the Figure B). 'NbpromUT': weekly number of promenade type exercise for UT; 'NbpromQT': weekly number of promenade type exercise for QT; 'NbjogUT': weekly number of jogging type exercise for UT; 'NbjogQT': weekly number of jogging type exercise for QT; 'NbWUT': weekly number of parcours or interval type exercise for UT; 'NbWQT': weekly number of parcours or interval type exercise for QT; 'Experience': number of years that trainers trained trotters; 'Age': age of trainers; 'Victory': number of wins per trainer in his career.

Table 4. Coefficients of correlation of trainers characteristics and weekly workload of unqualified trotters and qualified trotters.

Characteristic[1,2]	Experience	Age	Victory	NbpromUT	NbpromQT	NbjogUT	NbjogQT	NbWUT	NbWQT
Experience	1								
Age	0.85**	1							
Victory	0.51	0.42	1						
NbpromUT	-0.08	-0.17	-0.05	1					
NbpromQT	-0.19	-0.26	-0.43	0.63	1				
NbjogUT	0.53	0.57	0.56	-0.37	-0.44	1			
NbjogQT	0.46	0.46	0.75**	-0.45	-0.71*	0.55	1		
NbWUT	-0.47	-0.55	-0.23	0.00	0.25	-0.40	-0.17	1	
NbWQT	-0.31	-0.34	0.20	0.26	0.02	0.21	-0.15	0.21	1

[1] 'NbpromUT': weekly number of promenade type exercise for unqualified trotters (UT); 'NbpromQT': weekly number of promenade type exercise for qualified trotters (QT); 'NbjogUT': weekly number of jogging type exercise for UT; 'NbjogQT': weekly number of jogging type exercise for QT; 'NbWUT': weekly number of parcours or interval type exercise for UT; 'NbWQT': weekly number of parcours or interval type exercise for QT; 'Experience': number of years that trainers trained trotters; 'Age': age of trainers; 'Victory': number of wins per trainer in his career.
[2] Significance: ** at $P<0.01$; * at $P<0.05$.

4. Discussion

This study investigated the training practices of a sampling frame of trainers, exclusively composed of trainers located at the Grosbois training centre in Paris, France. Trainers surveyed represented 23% of the total number of trainers present in this training centre during the Meeting 2011-2012.

The characterisation of the training management and the identification of the typical weekly workload undertaken by unqualified and qualified elite Standardbred trotters allowed us to draw some key conclusions. It was clear that trainers used each week a number of different exercise types which greatly varied in terms of intensity, duration and frequency. Whilst the weekly training plan varied between trainers, it seems that the individual trainer's annual programme was relatively constant, consisting of a repetition of a typical training week. Moreover, the estimated training weekly workload did not appear to differ between the two age categories, with apparently similar exercises and training loads being used to train both unqualified and qualified trotters.

This study reported that French trainers developed training plans through the use of specific exercises in order to prepare their trotters for the highest level of performance possible. The judicious choice of the different types of exercise targeted the development of specific physical capacities such as aerobic endurance, speed and strength, as mentioned by trainers. In order to optimise training efficiency, trainers can manipulate certain variables such as the volume (duration, distance and frequency), the intensity (velocity or power output), and the density (frequency) of the training their horses undertake; all of which are recognised as key variables in training (Bompa and Haff, 2009). In this study, trainers used four different types of exercise within their training programme, i.e. 'promenade', 'jogging', 'parcours' and 'interval' type exercises. These exercises varied considerably in volume, intensity and frequency, from long and light to short and heavy and included more modern training methods, such as interval training (Billat, 2001). The 'jogging' exercise was conducted at approximately 6.9 m/s and on average lasted approximately 45 min. The reason given by the trainers for performing such 'jogging' exercise at relatively low speeds and over a long duration was mainly to develop aerobic endurance of horses. It has been reported that the duration of exercise is in fact more important than the exercise intensity on the extent of any training adaptation in muscle oxidative capacity and capillarisation and thus oxygen transport and aerobic capacities in horses (Rivero *et al.*, 2007).

For developing specific physical capacities (speed and strength), French trainers utilised the more intense type of exercises; in particular the 'interval' type exercise, which consisted of undertaking 5 or 6 bouts of exercise over approximately 1000 meters at a high speed (10-11 m/s) with an active recovery between each bout, in order to develop the speed capacity. This 'interval' type exercise used by French trainers is effectively a variant of interval training, which by definition involves the repeated performance of short to long bouts of exercise performed at high intensity, interspersed with periods of low-intensity exercise or complete rest (Bompa and Haff, 2009). This training concept, when first introduced into human training programmes, stimulated great interest because it greatly increased physiological adaptations to training (Burgomaster *et al.*, 2005; Laursen and Jenkins,

2002). To simulate the physiological requirement of actual race, trainers frequently used the 'parcours' type of exercise. This was therefore undertaken over the same distances as the races, i.e. from 1,500 to 5,000 m with a mean distance of 2,973±1,223 m at 9.7±0.6 m/s with a final sprint phase. This last component was of great interest to the trainers and was used by the trainers to train the trotters to increase their speed over the last 500 meters of races. However, when high volume or high intensity training is undertaken without sufficient recovery phases, athletes can develop chronic fatigue that can lead to overtraining (Bompa and Haff, 2009). To minimise these risks, French trainers used the 'promenade' exercise as an active recovery phase undertaken at walk and at trot in the woods, and included as a relaxation phase. Active recovery with light exercise is thought to be more efficient than a passive recovery strategy, i.e. total inactivity of subjects. In humans, at least, researchers have reported that when active recovery is implemented, the typical performance deficits associated with exercise-induced fatigue are attenuated (Mika *et al.*, 2007; Monedero and Donne, 2000). However, the actual intensity of the active recovery phase is very important so as not to induce additional fatigue (Bompa and Haff, 2009). In humans, it has been concluded that an active recovery phase performed at intensities less than 50% of the maximal oxygen uptake (VO_{2max}) provides significant and beneficial effects for lactate clearance (Monedero and Donne, 2000) and a reduction in exercise-induced muscle soreness (Reilly and Rigby, 2002). Due to a lack of equipment to monitor individual physiological responses during the exercise programmes used by the trainers in this study, it is obviously difficult to really appreciate the training/recovery stimulus received by each trotter. The use of portable devices for monitoring, for example, heart rate or oxygen uptake could potentially be a great benefit in this area.

Although French trainers used these different exercises during the week, it appeared that the weekly workload was relatively constant and repetitive throughout the racing season. This could partly be explained because the French race organisation does not allow trainers to prepare their trotters for a key race or establish monthly or annual training plans because race commitments are official only two days before the race day. This is underlined by the common comment spontaneously reported by trainers about the 'difficulty to plan our training for one key race'. Work has shown that the optimal training stimulus occurs in response to a systematic variation in annual training load (Stone *et al.*, 2007). Therefore, if the training stimulus or workloads are carried out in a monotonous fashion, it is likely that the athlete concerned will experience accommodation or stagnation, which will halt any improvement in performance. Therefore, ideally any training program must include planned variation, whereby novel tasks are introduced periodically throughout the annual training plan. In humans, it was well documented that the introduction of such novel tasks will result in a greater stimulatory effect and greater adaptation (Hodges *et al.*, 2005). Across a human athlete's career, the volume of training tends to increase (Olbrect, 2000), because as the athlete becomes more trained, greater training volumes are necessary to stimulate the physiological adaptations necessary to increase performance. This suggests that elite trotters could improve their performance if a rigorous, appropriate, annual planning programme could be established. The use of a number of different exercises with the introduction of appropriate novel tasks (for example stretching or lunge exercises) could potentially be beneficially adopted in training of racehorses.

Interestingly, the same spectrum of exercise types was used to train all the trotters in this study regardless of their training level, which was different from the findings in Germany. Indeed, the successful German trainer used the tempo exercise, which is equivalent to the French 'jogging' exercise, almost exclusively to train 2-year old trotters, whereas French trainers used this exercise for all trotters. The French practices may have both economical and physiological underlying factors. Economically, trainers are sometimes confronted by owner pressure to enter races earlier than they might think is ideal for the horse. Due to the shorter career duration of trotters compared to many other sport horses (peak activity for trotters is close to 4-year old, while it is around 11-12 year old for jumping or eventing horses), trainers have to optimise the time to prepare them for racing. Thus, the physical capacities of young Trotters have to be tested rapidly, as soon as they start working. In 2011 in France, of the 15,540 unqualified trotters presented for a qualification test, 4,970 of them were qualified (Annual report Cheval Français, 2011). In other words, only 32% of young trotters have sufficient skills to justify continuing training and racing. This leads to a lower proportion of qualified and older horses compared to unqualified and young horses in the training stables.

The lack of training differences between unqualified and qualified trotters in this report could also have physiological reasons particularly linked to the age. In humans, the effects of age on the resistance to fatigue, on the motivation or again on cardiorespiratory function (Ogawa *et al.*, 1992) have been previously reported. Indeed, young athletes with higher resistance to fatigue and higher motivation than older adults, responded better to high level of training (Ratel *et al.*, 2003). Although the effects of age on resistance to fatigue and motivation have not been demonstrated in racehorses, it seems that age may also have adverse or deleterious effects on cardiorespiratory function, such as a decreased of maximal heart rate or maximal oxygen uptake, in horses (Betros *et al.*, 2002). In this study this effect was seen in geriatric horses (27.0±0.2 years) compared with young (6.8±0.4 years) and middle-aged horses (15.2±0.4

years). We could hypothesise that unqualified trotters had similar weekly workloads to the older qualified trotters because they are more resistant to fatigue and also because they are potentially less likely than intensely trained racehorses to sustain injury such as musculoskeletal injury (Bailey *et al.*, 1997).

Although the same spectrum of exercises was used to train unqualified and qualified French trotters, unqualified trotters tended to undertake fewer 'promenade' and 'parcours' exercises per week than the qualified race-trotters. Unqualified trotters also tended to undertake less 'interval' type training sessions per week than qualified race-trotters. During a work session, unqualified trotters carried out more repetitions over a higher distance than qualified-trotters. The trainers rationale for using the 'interval' type exercise for young trotters was to enable them to 'learn' to trot at speed, as mentioned above. The actual choice of the mixture of exercise types used could be partially explained by the trainer's characteristics such as their age, experience or number of wins. Indeed, it seemed that the older the trainers were, the less they used 'real' work ('parcours' or 'interval' type exercises) and the more they used weekly 'jogging' for unqualified trotters. Also a positive correlation was observed between the number of 'jogging' exercises undertaken and the number of wins. Generally, the more successful trainers switched and promoted the 'jogging' type of exercise regardless of the animal training level or age. Indeed, some trainers specified, for qualified trotters, that they preferred to maintain their fitness level through such aerobic exercise in order to 'prolong the careers of qualified trotters'. For unqualified trotters, the 'jogging' exercise was used to develop aerobic capacity and endurance / resistance. It seems that such 'jogging' exercise is a widespread practice because it appears also to be used by a successful German trainer (Wegener *et al.*, 2012). These data, however, should be confirmed by an in-depth survey investigating specifically the workload from breaking to qualification in French trotters.

This survey provides information about how French race-trotters, at least a sub-population, are trained. We identified information on the weekly and annual training plans for unqualified and qualified trotters. The present study provides initial data on the similarities and differences in current training practices for unqualified and qualified trotters. It would be interesting to survey more trainers in France in order to have the whole spectrum of the different training methods used. This would enable constructive advice to be provided on how training methods might be adapted beneficially in the future. In addition, it would be interesting to be able to evaluate the benefits of monitoring, on an individual animal basis, various physiological measures during and after exercise in order to determine if these would be of value to help provide individually targeted and tailored training programmes for optimal physiological adaptations.

Acknowledgements

This study was supported by INRA PHASE, the Burgundy Region, AgroSup Dijon and the Equine Studies Group, WALTHAM Center for Pet Nutrition UK. The authors gratefully acknowledge the trainers of trotters and the staff of URANIE for their active participation.

References

Armstrong, N. and Welsman, J., 2000. Development of aerobic fitness during childhood and adolescence. Pediatric Exercise Science 12: 128-149.

Art, T., 2011. Applied training physiology. In: Proceedings of the 5th European Nutrition and Health Congress (EENHC), Waregem, Belgium, April 15-16, pp. 33-49. Available at: http://www.ivis.org/proceedings/eenhc/2011/Art.pdf?LA=1.

Bailey, C.J., Reid, S.W.J., Hodgson, D.R., Suann, C.J. and Rose, R.J., 1997. Risk factors associated with musculoskeletal injuries in Australian Thoroughbred racehorses. Preventive Veterinary Medicine 32: 47-55.

Baker, D., Wilson, G. and Carlyon, R., 1994. Periodization: the effect on strength of manipulating volume and intensity. Journal of Strength and Conditioning Research 8: 235-242.

Betros, C., McKeever, K., Kearns, C. and Malinowski, K., 2002. Effects of ageing and training on maximal heart rate and VO_{2max}. Equine Veterinary Journal Suppl. 34: 100-105.

Billat, L., 2001. Interval training for performance: a scientific and empirical practice. Special recommendations for middle- and long-distance running. Part I: aerobic interval-training. Sport Medicine 13: 13-31.

Bompa, T. and Haff, G., 2009. Periodisation: theory and methodology of training. Human Kinetics, Champaigne, IL, USA.

Burgomaster, K., Hughes, S., Heigenhauser, G., Bradwell, S. and Gibala, M., 2005. Six sessions of sprint interval training increases muscle oxidative potential and cycle endurance capacity in humans. Journal of Applied Physiology 98: 1985-1990.

Evans, D., Rainger, J., Hodgson, D., Eaton, M. and Rose, R., 1995. The effects of intensity and duration of training on blood lactate concentrations during and after exercise. Equine Veterinary Journal Suppl. 18: 422-425.

Foster, C., Hector, L., Welsh, R., Schrager, M., Green, M. and Snyder, A., 1995. Effects of specific versus cross-training on running performance. European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology 70: 367-372.

Hinchcliff, K. and Geor, R., 2008. The horse as an athlete: a physiological overview. In: Hinchcliff, K.W., Geor, R.J. and Kaneps, A. (eds.) Equine exercise physiology. The science of exercise in the athletic horse. Saunders Elsevier, New York, NY, USA, pp. 2-11.

Hodges, N., Hayes, S., Horn, R. and Williams, A., 2005. Changes in coordination, control and outcome as a result of extended practice on a novel motor skill. Ergonomics 48: 1672-1685.

Husson, F., Joss, J., Le, S. and Mazet, J., 2008. Factor analysis and data mining with R. R package version 1.10. Available at: http://www.agrocampus-rennes.fr/math/.

Kallinen, M. and Markku, A., 1995. Aging, physical activity and sports injuries: an overview of common sports injuries in the elderly. Sports Medicine 20: 41-52.

Laursen, P. and Jenkins, D., 2002. The scientific basis for high-intensity interval training: optimising training programmes and maximising performance in highly trained endurance athletes. Sports Medicine 32: 53-73.

Mika, A., Mika, P., Fernhall, B. and Unnithan, V., 2007. Comparison of recovery strategies on muscle performance after fatiguing exercise. American Journal of Physical Medicine and Rehabilitation 86: 474-481.

Monedero, J. and Donne, B., 2000. Effects of recovery interventions on lactate removal and subsequent performance. International Journal of Sports Medicine 21: 593-597.

Ogawa, T., Spina, R., Martin, W., Kohrt, W., Schechtman, K., Holloszy, J.O. and Ehsani, A.A., 1992. Effects of aging, sex, and physical training on cardiovascular responses to exercise. Circulation 86: 494-503.

Olbrect, J., 2000. The science of winning. Planning, periodization, and optimizing swim training. 2nd ed. Swim-shop, Luton, UK.

Ratel, S., Lazaar, N., Williams, C., Bedu, M. and Duche, P., 2003. Age differences in human skeletal muscle fatigue during high-intensity intermittent exercise. Acta Paediatrica 92: 1248-1254.

Reilly, T. and Rigby, M., 2002. Effect of an active warm-down following competitive soccer. In: Spinks, W., Reilly, T. and Murphy, A. (eds.) Science and football IV. Routledge, London, UK, pp. 226-229.

Rivero, J., Ruz, A., Marti-Korff, S., Estepa, J., Aguilera-Tejero, E., Werkman, J., Sobotta, M. and Lindner, A., 2007. Effects of intensity and duration of exercise on muscular responses to training of thoroughbred racehorses. Journal of Applied Physiology 102: 1871-1882.

Stone, M., Stone, M. and Sands, W., 2007. Principles and practice of resistance training. Human Kinetics, Champaigne, IL, USA.

Viru, A. and Viru, M., 2000. Nature of training effects. In: Garrett, W. and Kirkendall, D. (eds.) Exercise and sport science. Lippincott Williams & Williams, Philadelphia, PA, USA, pp. 67-95.

Wegener, J., Lindner, A. and Hartmann, U., 2012. Survey on the training of Standardbred racehorses by a successful trainer. Pferdeheilkunde 28: 268-280.

Wilmore, J., Costill, D. and Kenney, W., 2009. Physiologie du sport et de l'exercice. 4th ed. De Boeck, Bruxelles, Belgium.

1.3.2 La détermination de la v500 des chevaux de Grosbois

Les fréquences cardiaques moyennes relevées sur la distance de 500 m étaient de 221 ± 3 bpm et 216 ± 11 bpm pour les UT et QT respectivement. Les FCpic enregistrées variaient de 226 ± 6 bpm pour les UT à 218 ± 12 bpm pour les QT.

La v500 moyenne des UT était de 12,5 ± 0,0 m/s et de 14,2 ± 1,0 m/s pour les QT. La performance réalisée au test v500 des trotteurs non qualifiés témoigne d'une part des qualités exceptionnelles des chevaux trotteurs, qui après seulement 1 an de travail, parcourent déjà les 500 m à 12,5 m/s. La difficulté chez les chevaux non qualifiés considérés comme des 'poulains' est justement cette mécanisation à se déplacer à des vitesses de course élevée. Les trotteurs doivent en effet apprendre et trouver 'leur passage' c'est-à-dire la coordination entre leurs membres pour ne pas les entrechoquer et commettre ainsi la faute *i.e.* partir au galop ou tout autre allure que le trot. Concernant les chevaux qualifiés ayant déjà une expérience certaine en compétition, ils parcourent en moyenne 500 m à 14,2 m/s. Parmi les chevaux qualifiés enquêtés, nous avions surtout des chevaux de série, *i.e.* chevaux participant aux courses de série, et un seul cheval de groupe, *i.e.* cheval participant aux courses de Groupe, qui a parcouru les 500 m en 15,6 m/s.

1.3.3 La caractérisation de l'intensité des exercices d'entraînement en fonction de la v500

La mesure de v500 avait pour objectif d'exprimer l'intensité des quatre exercices précédemment identifiés en pourcentage de v500. Le Tableau 14 présente les caractéristiques des quatre exercices identifiés pour les UT et QT avec l'intensité d'effort exprimée en pourcentage de v500.

Tableau 15. Descriptif des exercices spécifiques utilisés dans l'entraînement des trotteurs non qualifiés (UT) et qualifiés (QT).

	Promenade		**Jogging**		**Parcours**		**Interval**	
	UT	QT	UT	QT	UT	QT	UT	QT
Echauffement								
Heat 1								
% v500					53 ± 9	48 ± 8	53 ± 9	48 ± 8
Vitesse (m/s)					6,7 ± 1,1	6,8 ± 1,2	6,7 ± 1,1	6,8 ± 1,2
Durée (min)					10'3 ± 3'5*	9'3 ± 5'2*	10'3 ± 3'5*	9'3 ± 5'2*
Distance (m)					3973 ± 1476	4057 ± 1885	3973 ± 1476	4057 ± 1885
Heat 2								
% v500					83 ± 8	70 ± 4	83 ± 8	70 ± 4
Vitesse (m/s)					10,4 ± 1,0	9,9 ± 0,6	10,4 ± 1,0	10,0 ± 0,6
Durée (min)					3'3 ± 0'5*	4'2 ± 1'3*	3'3 ± 0'5*	4'2 ± 1'3*
Distance (m)					2200 ± 283	2580 ± 826	2200 ± 283	2580 ± 825
Exercice								
% v500	41 ± 4	37 ± 4	53 ± 12	51 ± 12	77 ± 5	74 ± 6	81 ± 11 / nc	79 ± 3 / nc
Vitesse (m/s)	5,2 ± 0,5	5,2 ± 0,5	6,7 ± 1,4	7,2 ±1,7	9,6 ± 0,6	10,5 ± 0,9	10,1 ± 1,3 / nc	11,1 ± 0,5 / nc
Durée (min)	46'4 ± 9'0	46'4 ± 9'0	40'0 ± 10'4	49'2 ± 11'2	4'4 ± 3'0*	4'4 ± 1'5*	1'4 ± 0'1 / ~2'*	1'2 ± 0'1 / ~2'*
Distance (m)	14560 ± 3895*	15560 ± 3752*	16620 ± 7725*	13554 ± 11230*	2683 ± 1750	2973 ± 1123	1071 ± 236 / nc	907 ± 117 / nc
Répétitions / séance	1	1	1	1	1,8 ± 0,7	1,4 ± 0,5	4,7 ± 1,4	5,5 ± 1,3
Fréquence / semaine	1,0 ± 1,0	1,9 ± 1,6	1,2 ± 1,1	1,2 ± 1,2	1,3 ± 0,5	1,7 ± 0,6	1,2 ± 0,4	1,0 ± 0,3
Récupération								
% v500					45 ± 12	38 ± 12	45 ± 12	38 ± 12
Vitesse (m/s)					5,6 ± 1,5	5,4 ± 1,7	5,6 ± 1,5	5,4 ± 1,7
Durée (min)					14'3 ± 11'0	17'1 ± 11'3	14'3 ± 11'0	17'1 ± 11'3
Distance (m)					2283 ± 512	2387 ± 718	2283 ± 511	2387 ± 718

* Valeurs estimées à partir des données indiquées par les entraîneurs, nc : valeur non communiquée par les entraîneurs,

CHAPITRE 2

Mise au point d'un test d'effort incrémental et de la relation individuelle VO_2/FC

Pour établir les relations individuelles entre la consommation d'oxygène et la fréquence cardiaque des chevaux trotteurs maintenus en condition expérimentale contrôlée, nous avons réalisé un essai visant à définir un protocole de test incrémental continu.

2.1 Le test d'effort incrémental continu

L'objectif de ce travail était de tester les effets de deux protocoles de tests incrémentaux continus sur les réponses cardiorespiratoires des chevaux trotteurs. Les protocoles, dont la vitesse initiale (4,2 *vs.* 6,4 m/s) (15 *vs.* 23 km/h), la durée des paliers (3 *vs.* 2 min) et l'incrément de vitesse (1,4 *vs.* 0,8 m/s) (5 *vs.* 3 km/h) variaient, ont été testés. Les protocoles ont été évalués sur leur capacité à solliciter les plus hautes réponses cardiorespiratoires au trot, leur application en conditions de terrain mais aussi la précision de la régression VO_2/FC obtenue.

2.2 La relation VO_2/FC

L'objectif était de définir les mises au point méthodologiques pour établir la relation VO_2/FC dans un objectif de quantification énergétique à partir de mesures de FC. Les résultats de l'étude précédente ont mis en évidence que l'établissement de la courbe de régression nécessite de définir la nature de la relation et la méthode de détermination de la courbe individuelle VO_2/FC. De plus, un des deux protocoles précédemment testés permet d'obtenir une régression VO_2/FC plus précise.

2.3 Les résultats et discussion

2.3.1 La mise au point d'un test incrémental continu en condition de terrain

Ce travail a été valorisé sous la forme d'une publication soumise et acceptée à Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition, DOI: 10.1111/jpn.12242. Les données de chaque cheval obtenues au cours des deux protocoles sont présentées en Annexe 2.

Publication 2

Effects of two field continuous incremental tests on cardiorespiratory responses in Standardbred trotters

J Fortier, AG Goachet, V Julliand and G Deley

Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition, 2014, DOI: 10.1111/jpn.12242

Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition

DOI: 10.1111/jpn.12242

ORIGINAL ARTICLE

Effects of two field continuous incremental tests on cardiorespiratory responses in Standardbred trotters

J. Fortier[1], A. G. Goachet[1], V. Julliand[1] and G. Deley[2]

1 URANIE - USC1335 Nutrition du cheval athlète, AgroSupDijon, Dijon Cedex, France, and
2 Centre d'Expertise de la Performance, Faculté des Sciences du Sport, Dijon, France

Summary

In humans, cardiorespiratory responses are widely evaluated from field incremental exercise tests. On the contrary, equine exercise physiology faces a huge lack of oxygen consumption measurements (VO_2) in field conditions due to technical concerns. The aim of this study was to test the effects of two incremental continuous field tests on cardiorespiratory responses in Standardbred trotters. The two protocols were realized at trot and ended when horses galloped. The tests started at 4.2 m/s (T1) and 6.4 m/s (T2), with speed increments of 1.4 m/s every 3 min for T1 and 0.8 m/s every 2 min for T2. Velocity (v), heart rate (HR) and gas exchanges were recorded continuously, and blood lactate concentration [La^-] was measured before and after tests. Values recorded at the end of the tests were considered as peak values. The v_{peak} values were 10.6 ± 0.3 and 10.7 ± 0.7 m/s for T1 and T2 respectively. Horses reached higher VO_{2peak} (T1: 116.6 ± 11.5 ml/min/kg; T2: 88.9 ± 10.2 ml/min/kg; $p < 0.05$) and HR_{peak} (T1: 217 ± 5 bpm; T2: 209 ± 3 bpm; $p < 0.05$) during T1 compared with T2. T1 was significantly longer than T2 (17.5 ± 1.9 *vs.* 12.9 ± 1.6 min respectively, $p < 0.01$), and the number of steps entirely ran tended to be different (T1: 5.6 ± 0.6; T2: 6.2 ± 0.8, $p = 0.07$). Compared to T2, the design of T1 appeared easier to implement and allowed higher cardiorespiratory responses. The relationship between HR-VO_2 obtained through T1 gave a better correlation between the two variables than T2. These findings suggest that T1 might be better than T2 for evaluating cardiorespiratory adaptations to exercise and for estimating aerobic energy expenditure in exercising trotters.

Keywords horses, oxygen uptake, heart rate, exercise

Correspondence J. Fortier, AgroSup Dijon, Pôle Agricole, Route d'Arnay le Duc, 21 320 Créancey, France. Tel: +33 (0)3 80 64 01 78; Fax: +33 (0)3 80 90 18 95; E-mail: j.fortier@agrosupdijon.fr

Received: 13 December 2013; accepted: 22 July 2014

Introduction

In exercise physiology, fitness level is commonly evaluated through the cardiorespiratory adaptations to exercise test. This information provides the trainers an objective mean allowing quantifying the athlete's evolution, his/her potential for stagnation or the risk of performance deterioration (Bompa and Haff, 2009).

In humans, cardiorespiratory responses are currently evaluated from incremental tests performed in field conditions (Lèger et al., 1988; Ramsbottom et al., 1988) to determine the level of physiological solicitation, to assess the effects of training protocols and to rationalize training programs, *that is,* the intensity being expressed as the velocity at VO_{2max} or in percentage of VO_{2max} for instance (Berthoin et al., 2001). While physiological responses are influenced by the characteristics of the tests such as the initial velocity, the step duration or the velocity increment (Berthoin et al., 2001; Bentley et al., 2007), test protocols need to be carefully designed according to what measure is expected. The determination of the adequate test protocol is therefore of interest to researchers and clinicians involved in humans exercise physiology (Bruce, 1972; Pollock et al., 1976).

In Standardbred trotters, the existing field tests conducted for evaluating the fitness level (Dubreucq et al., 1995; Couroucé et al., 1997; Essén-Gustavsson et al., 1997; Davie et al., 2002) are often submaximal discontinuous exercise tests separated by 1–2 min of break necessary for making blood samplings. These protocols were designed to easily evaluate adaptations to exercise based on measurable parameters (heart rate, blood lactate and derived parameters). However, according to the specificities of Standardbred trotting (in competition, Standardbred trotters are required to

run as fast as possible exclusively at trot *i.e.* without galloping over 1600–4200 m), it would be of great interest to evaluate horses using a continuous effort at trot until reaching the highest physiological responses before being limited by the gait. Over the last decade, the development of a portable system adapted from human application offered the opportunity to measure gas exchanges in field conditions of a wide variety of activities in horses (Art et al., 2006; Votion et al., 2006; Van Erck et al., 2007; Goachet et al., 2011) and opened new perspectives to assess cardiorespiratory responses under genuine conditions.

Therefore, we aimed at testing the effects of two incremental continuous field tests on cardiorespiratory responses in Standardbred trotters. The two protocols tested varied in their initial velocity (4.2 *vs.* 6.4 m/s), in their step duration (3 *vs.* 2 min) and in their velocity increment (1.4 *vs.* 0.8 m/s).

Materials and methods

The project was conducted under ethic committee of animal experimentations of Grand Campus Dijon, France approval n° B1110.

Horses and horses' management

Five healthy driven French Trotters geldings with an average age of 7.4 ± 1.5 years and a mean bodyweight (BW) of 474 ± 43 kg and body condition score of 3.3 ± 0.4 [on a scale of 0 to 5, (INRA-HN-IE, 1997)] participated in the experiment. They were housed separately in 4 × 3.5 m free stalls, on straw bedding, and were put into sandy paddocks for free exercise for 2 h daily. Clean potable drinking water and a block of trace-mineralized salts were offered free-choice. After 6 months of inactivity, horses were conditioned during 8 weeks before the tests. During the conditioning, horses were driven at trot twice a week, on average 2 h per week, on a 1150 m sandy track, according to a training program which increased gradually from light work (2 times 3000 m at 7.0 m/s) to moderate-intensity work consisting in an interval exercise [(500 m at 11 m/s + 500 m at 5.6 m/s) repeated 6 times]. All exercise sessions were preceded by a 10 min warm-up at a velocity ranged from 5.5 to 6.9 m/s and ended with a cooling down which consisted of 2000 m at slow trot (4.2 m/s).

Exercise tests

Horses completed randomly the two exercise tests separated by at least 1 week to avoid fatigue. Both tests were carried out without warm-up because of the low speeds at start. Test 1 (T1) started at 4.2 m/s with speed increments of 1.4 m/s every 3 min until exhaustion. Test 2 (T2) started at 6.4 m/s with speed increments of 0.8 m/s every 2 min until exhaustion. Tests ended when the horses could no longer sustain the imposed speed despite verbal encouragements of the driver or when they committed a fault, that is, they ran in another gait than trot (gallop, pace and ambling).

Respiratory gas collection

The flow-through system used for measuring respiratory gas exchanges was a commercially available portable metabolic measurement system (Fig. 1), classically employed for measurements in humans (K4b²; COSMED, Rome, Italy). The gas collection system consisted of a plastic airtight face mask (Equimask, COSMED) and designed to limit the dead space. Respiratory airflow is measured using two turbines attached on the face mask. One of the turbines was fitted with a ventilation opto-electronic reader which counts the rotation of the turbine. Expired gases were sampled and analysed in a portable unit on a breath-by-breath basis using a Cosmed certified oxygen-polarographic cell analyser (range 7–24%) and an infrared non-dispersive thermostatically controlled carbon dioxide analyser (range 0.0–8%). Gases collection was sampled to the analyser via 2 semi-permeable sampling catheters (Permapure Naflon) placed in series. The system was powered by a rechargeable battery. Before each test and each horse, the O_2 and CO_2 analysers were calibrated by a 2 point calibration. The first one was ambient air assumed to have a fractional oxygen

Fig. 1 A Standardbred trotter exercising a field test with the Equimask connected to the portable gas analyser K4b² with his battery fixed on the sulky.

concentration of 20.9% and a fractional carbon dioxide of 0.03% and the second one a gas of known concentration with 16% of O_2 and 5% CO_2. A pre-test, specified by the manufacturer, was used to establish a delay calibration between airflow and gas signals. During the tests, the analyser and battery were fixed on the sulky and a headcheck was placed on the horses to protect the face mask against shocks (Goachet et al., 2011).

Heart rate recording and blood draw

HR was recorded continuously using the Polar system (Polar, Polar Electro OY, Kempele, Finland) incorporated to the K4b² system. Additionally, venous blood was collected before tests and immediately after the end of tests for determination of blood lactate concentration. Blood samples were taken via venipuncture of the jugular vein into one 5-mL pre-treated potassium oxalate/sodium fluoride tube. Plasma for the measurement of [La⁻] was obtained by centrifugation of tubes (450 *g* for 10 min) and transferred into dry tubes. All tubes were then frozen (at −20 °C) and sent to Franck Duncombe Laboratory (Caen, France) for analysis by enzymatic colorimetric method (kits n° LC 2653, Randox, Crumlin, UK).

Data analysis

The captured data were downloaded using the K4b² management data software. Cardiorespiratory responses were filtered and averaged over 5 s, and the curves were smoothed with a 3 points index (Duffield et al., 2004). The relationships between velocity and VO_2 (v-VO_2) and heart rate (v-HR) for each horse were determined by linear regression of VO_2, velocity and HR during tests. The relationship between HR and VO_2 (HR-VO_2) was determined for each horse, from the values of HR and VO_2 (ml/min/kg) obtained during the last minute of each step of exercise (Spurr et al., 1988). The HR-VO_2 relationship was analysed in a polynomial regression model using routine statistical procedure.

Respiratory exchange ratio (RER = VCO_2/VO_2) and O_2pulse (VO_2/HR) were then calculated to indicate the blend of substrates used and cardiovascular efficiency during exercise. VT (Ventilatory Threshold) was determined using the V-slope method (Beaver et al., 1986; McDonough et al., 2002). Values averaged over two min before the beginning of the test in horses not moving represented *rest* data. *Threshold* data were determined from the VT point identified by V-slope method, and *peak* values were averaged over the last 30 s of the last step of the test entirely performed at trot.

Statistical analysis

All measurements were expressed as mean ± standard deviation (SD). A paired t-test was used to compare the variables between the two continuous incremental field protocols (T1 and T2). Pearson's correlation coefficient was calculated to determine possible associations between VO_2 and velocity and between VO_2 and HR. The level of significance of 5% ($p < 0.05$) was adopted in all analyses.

Results

The five horses tolerated the equipment well. *At rest*, mean of HR, VO_2, VCO_2, RER and [La⁻] responses were 47 ± 6 bpm, 2.65 ± 0.67 ml/min/kg, 2.38 ± 0.70 ml/min/kg, 0.88 ± 0.09 and 0.47 ± 0.14 mmol/l respectively. No significant difference was observed between the two tests for these variables.

For both exercises tests, cardiorespiratory responses increased proportionally to the velocity as shown in Fig. 2. The regression coefficients of the VO_2/velocity

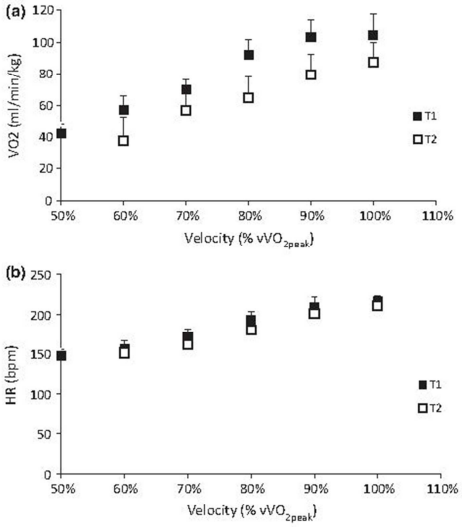

Fig. 2 Pulmonary oxygen uptake (VO_2, expressed in ml/min/kg) (a) and heart rate (HR) (b) as a function of velocity (expressed as a percentage of vVO_{2peak}) in five Standardbred trotters during protocols T1 (black blocks) and T2 (white blocks).

relationships tended to be influenced by the protocol (T1, $r = 0.90 \pm 0.06$; T2, $r = 0.81 \pm 0.05$, $p = 0.09$), whereas the regression coefficients of the HR/velocity relationships were not significantly different between tests. The HR and VO_2 parameters were highly correlated and the correlation tended to be higher during T1 than T2 (T1, $r = 0.93 \pm 0.03$; T2, $r = 0.88 \pm 0.06$, $p = 0.06$, Fig. 3). VT occurred at 79.2% and 81.9% of VO_{2peak} during T1 and T2 respectively, which corresponded to $86.2 \pm 1.1\%$ and $82.9 \pm 6.4\%$ of vVO_{2peak}. The RER measured at VT was significantly greater for T2 (1.08 ± 0.08) than for T1 (0.96 ± 0.04) ($p < 0.05$).

The tests ended when horses could not trot at the imposed speed or when they galloped. The v_{peak} values obtained were 10.6 ± 0.3 and 10.7 ± 0.7 m/s for T1 and T2 respectively. Horses reached higher VO_{2peak}, HR_{peak} and O_2pulse_{peak} during T1 compared with T2 ($p < 0.05$) (Table 1). However, the vVO_{2peak} achieved was not significantly different between T1 and T2 (10.6 ± 0.3 *vs.* 10.7 ± 0.7 m/s respectively) (Table 1). T1 was significantly longer than T2 (17.5 ± 1.9 *vs.* 12.9 ± 1.6 min respectively, $p < 0.01$), and the number of steps entirely ran tended to be different (T1, 5.6 ± 0.6; T2, 6.2 ± 0.8, $p = 0.07$). No difference between the two tests was observed regarding VCO_{2peak}, QR_{peak}, V_{Epeak} or plasma $[La^-]_{peak}$ responses (Table 1).

Discussion

This study aimed at testing the effects of two field incremental continuous tests on cardiorespiratory responses in Standardbred trotters.

Whereas the K4b^2 has been widely used in human exercise physiology and its reliability has been demonstrated in numerous studies (McLaughlin et al., 2001; Maiolo et al., 2003; Duffield et al., 2004), its reliability has not been examined in equine sciences. Some studies reported bias and underestimation of either the expired fraction (FE) in CO_2 or the V_E measurements (Art et al., 2006; Van Erck et al., 2007) at high exercise intensities. However, it was concluded that VO_2 measurements were acceptable (Art et al., 2006). Moreover, our VO_2 data were in accordance with published results under field conditions (Gauvreau et al., 1995; Van Erck et al., 2007). In the present study, the underestimation of the expired fraction in CO_2 was not incriminated as VCO_2 at respiratory rate of 10.7 ± 0.7 m/s was on average 120.6 ± 21.5 ml/min/kg, which was in agreement with previous reports on Standardbred horses on treadmill (Tyler et al., 1996). However, the V_{Epeak} measured in our study appeared to be lower than other data (1558 ± 221 l/min *vs.* 1603 ± 182, Van Erck et al., 2007; 1800 ± 80 l/min, Gauvreau et al., 1995) which was likely due to a lower Rf (Table 1). According to the manufacturer, the physiological high respiratory frequency of horses could exceed the technical K4b^2 capacities of CO_2 analyser and thus yield to an underestimation of the Rf and V_E values. It has also been suggested that an excessive resistance of the turbines and possibly dead space could impede ventilation as the flow rates increase (Art et al., 2006; Votion et al., 2006; Van Erck et al., 2007). Further modifications of the equine K4b^2 would be required to adapt the system to the ventilatory mechanisms of horses, particularly at high respiratory rates, whereas VO_2 and VCO_2 were relevant in the present study even at an exercise intensity higher than 10 m/s.

Regarding the testing protocol itself, few Standardbreds trainers use high speed treadmills or have

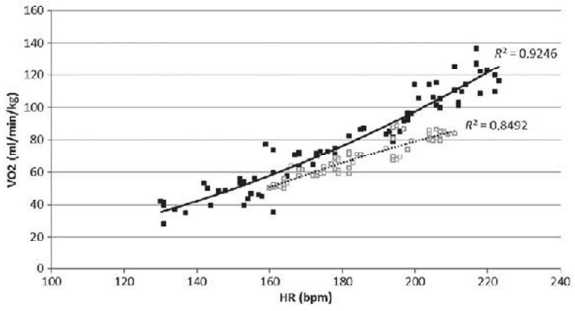

Fig. 3 Heart rate–oxygen consumption relationship (VO_2, expressed in ml/min/kg) during test T1 (black blocks) and test T2 (white blocks) for a representative horse. The correlation coefficients were expressed on the figure.

Table 1 Effects of two continuous incremental field exercise tests (T1 and T2) on peak cardiorespiratory parameters and plasma lactate concentration

	T1	T2
vVO_{2peak} (m/s)	10.6 ± 0.3	10.7 ± 0.7
HR_{peak} (bpm)	217 ± 5	209 ± 3*
$[La^-]_{peak}$ (mmol/l)	15.8 ± 4.0	16.3 ± 6.2
VO_{2peak} (ml/min/kg)	111.6 ± 11.5	88.9 ± 10.2*
VCO_{2peak} (ml/min/kg)	131.1 ± 18.4	110.1 ± 20.6
O_2pulse_{peak} (ml/beat)	247.6 ± 31.9	197.9 ± 27.3*
RER_{peak}	1.17 ± 0.05	1.20 ± 0.10
V_{Epeak} (l/min)	1588.9 ± 187.8	1527.9 ± 268.1
V_{Tpeak} (l)	18.5 ± 1.2	18.6 ± 1.5
Rf_{peak} (breath/min)	88.3 ± 19.0	82.2 ± 14.5

Values are means ± SD; $n = 5$; vVO_{2peak}, velocity at maximal oxygen uptake (VO_{2peak}); HR_{peak}, peak heart rate; $[La^-]_{peak}$, peak plasma lactate concentration; VO_{2peak}, peak oxygen uptake; VCO_{2peak}, peak carbon dioxide production; O_2pulse_{peak}, peak oxygen uptake per heartbeat; RER_{peak}, peak respiratory exchange ratio; V_{Epeak}, peak pulmonary ventilation; V_{Tpeak}, peak tidal volume; Rf_{peak}, peak respiratory frequency.
*Significantly different from T1 ($p < 0.05$).

access to them (Fortier et al., 2014), and therefore field exercise tests are of great interest for them. Compared to treadmill tests, field exercise tests present many advantages, such as testing athletes while performing the activity for which they are trained and conducting the test under conditions more reflective of competition (McDougall et al., 1991). However, limitation can be the difficulty to standardize them. For example, it has been previously reported that in field exercise, the environmental conditions (*i.e.* ambient temperature and humidity) can affect assessment of exercise responses (Hargreaves et al., 1999). In our study, environmental conditions were maintained as constant as possible during all the tests by avoiding extreme weather conditions. Furthermore, field exercise tests must be simple and easy to implement (Evans, 2008). With velocity increment of 1.4 m/s every 3 min, the exercise test T1 gave more time to trainer for managing horses' speed than T2. Three km/h of increment between steps for T2 appeared too small for an easy implementation. Further investigations will be necessary to test the reproducibility of our field exercise test with trotters.

In our study, the cardiorespiratory responses *at peak* elicited during T1 were significantly higher compared with T2. The effects of the protocols were only seen on the VO_2 and HR responses. These results were in accordance with previous findings in equine athletes, which indicated that the prediction of work capacity was possible from oxygen consumption and heart rate measurements (Persson, 1983; Kobayashi et al., 1999). VO_2 and HR responses did not demonstrate a plateau-like behaviour at the end of the two tests and justify the use of the terms VO_{2peak} and HR_{peak}. The two continuous incremental tests varied in their initial velocity (4.2 *vs.* 6.4 m/s), in their step duration (3 *vs.* 2 min) and in their velocity increment (1.4 *vs.* 0.8 m/s). These test characteristics were known to influence cardiorespiratory responses (Buchfuhrer et al., 1983; Bishop et al., 1998). In our study, HR_{peak} and VO_{2peak} were significantly higher during T1 with the 3 min speed increment which started at 40 ± 2.5% vVO_{2peak} than T2 with the 2 min speed increment and initial velocity at 61 ± 5.0% of vVO_{2peak}. Although there are several physiological differences in equines and humans (Art, 2011), we suspected that the high initial velocity in T2 induced earlier peak cardiac responses and impacted on exercise tolerance and fatigue assessment in our trotters, as it was documented in humans (Saltin et al., 1968; Bassett and Howley, 1997). Our results confirmed that peak cardiorespiratory responses of trotters are influenced by the incremental field test design, which need to be carefully selected depending on the variables that will be measured.

Incremental field exercise tests can also be used to establish the heart rate–oxygen consumption ($HR\text{-}VO_2$) relationship in energy expenditure studies for human athletes (Spurr et al., 1988; Butler et al., 2004). VO_2 measurement is an indirect calorimetric method used to estimate the energy expenditure of physical activity using the caloric equivalent of oxygen (Levine, 2005). For practical application, the $HR\text{-}VO_2$ relationship is established to predict oxygen uptake when VO_2 measurements are not possible and also to predict energy expenditure. In horses, a prediction model of $HR\text{-}VO_2$ relationship was developed from literature data with horses exercising under various conditions (Coenen, 2010). It was previously concluded that the $HR\text{-}VO_2$ relationship method gave a close estimate of energy expended and offered an inexpensive way of obtaining reasonably accurate data in exercising subjects (Spurr et al., 1988). However, it was also specified that to have the best estimates of individual energy expenditure, only individual $HR\text{-}VO_2$ curves should be used (Li et al., 1993). In horses, no field test exists to establish individual $HR\text{-}VO_2$ relationship in trotters exercising at different velocities. In the present study, the oxygen uptake increased proportionally to the velocity and was well correlated with the heart rate. Furthermore, the protocol T1 tended to induce a better correlation between HR and VO_2 (Fig. 3)

and might be used for future studies on energy expenditure.

In conclusion, this report measured oxygen uptake and physiological data in field conditions, to investigate the effects of continuous incremental exercise tests in Standardbred trotters. The protocol T1 induced significantly higher cardiorespiratory responses *at peak* compared with T2 and offered a better correlation between HR and VO_2 in function of the velocity of test. Further investigations are needed to examine the validity and reproducibility of values of test T1 and other test protocols too, to open the perspective of quantifying the energy expenditure of horses under field conditions.

Acknowledgements

This study was supported by Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) department Physiologie Animale et Systèmes d'Elevage (PHASE), the Burgundy Region and AgroSup Dijon. Authors acknowledge the trainers of horses and the staff of Unité de Recherche sur les ANImaux de l'Elevage (URANIE) for their active participation.

References

Art, T., 2011. Applied training physiology. In: European Nutrition & Health Congress (ed.) *Proceedings of the 5th European Nutrition & Health Congress (EENHC).* CABI-publishing, Warengem, 33 49.

Art, T.; Duvivier, D. H.; Van Erck, E.; De Moffarts, B.; Votion, D.; Bedoret, D.; Lejeune, J. P.; Lekeux, P.; Serteyn, D., 2006: Validation of a portable equine metabolic measurement system. *Equine Veterinary Journal Supplement* **36**, 557 561.

Bassett, D.; Howley, E., 1997: Maximal oxygen uptake: "classical" versus "contemporary" viewpoints. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **29**, 591 603.

Beaver, W.; Wasserman, K.; Whipp, B., 1986: A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. *Journal of Applied Physiology* **60**, 2020 2027.

Bentley, D.; Newell, J.; Bishop, D., 2007: Incremental exercise test design and analysis: implications for performance diagnostics in endurance athletes. *Sports Medicine* **37**, 575 586.

Berthoin, S.; Blondel, N.; Billat, V.; Gerbeaux, M., 2001: La vitesse à VO2max, signification et applications en course à pied. *Revue Staps* **54**, 45 61.

Bishop, D.; Jenkins, D. G.; Mackinnon, L. T., 1998: The effect of stage duration on the calculation of peak VO2 during cycle ergometry. *Journal of Science and Medicine in Sport* **1**, 171 178.

Bompa, T. O.; Haff, G. G., 2009: *Periodization 5th edition: Theory and Methodology of Training.* Human Kinetics, Champaign, IL.

Bruce, R., 1972: Multi-stage treadmill test of maximal and sub maximal exercise. In: American Heart Association. Committee on Exercise (ed), *Exercise Testing and Training of apparently Health Individuals: A handbook for physicians.* American Heart Association, New York, USA, pp. 32 34.

Buchfuhrer, M.; Hansen, J.; Robinson, T.; Sue, D.; Wasserman, K.; Whipp, B., 1983: Optimizing the exercise protocol for cardiopulmonary assessment. *Journal of Applied Physiology* **55**, 1558 1564.

Butler, P.; Green, J.; Boyd, I.; Speakman, J., 2004: Measuring metabolic rate in the field: the pros and cons of the doubly labelled water and heart rate methods. *Functional Ecology* **18**, 168 183.

Coenen, M., 2010: Remarks on benefits of heart rate recordings. In: Kentucky Equine Research (ed), *Feeding and Veterinary Management of the sport horse - Proceedings of the 17th Feeding and veterinary management of the sport horse.* Kentucky Equine Research Nutrition Conference, Kentucky Equine Research, Lexington, pp. 42 54.

Couroucé, A.; Chatard, J.; Auvinet, B., 1997: Estimation of performance potential of Standardbred trotters from blood lactate concentrations measured in field conditions. *Equine Veterinary Journal* **29**, 365 369.

Davie, A.; Priddle, T.; Evans, D., 2002: Metabolic responses to submaximal field exercise tests and relationships with racing performance in pacing Standardbreds. *Equine Veterinary Journal Supplement* **34**, 112 115.

Dubreucq, C.; Chatard, J.; Courouce, A.; Auvinet, B., 1995: Reproducibility of a standardised exercise test for Standardbred trotters under field conditions. *Equine Veterinary Journal Supplement* **18**, 108 112.

Duffield, R.; Dawson, B.; Pinnington, H.; Wong, P., 2004: Accuracy and reliability of a Cosmed K4b2 portable gas analysis system. *Journal of Science and Medicine in Sport* **7**, 11 22.

Essén-Gustavsson, B.; Ronéus, N.; Pösö, A., 1997: Metabolic response in skeletal muscle fibers of Standardbred trotters after racing. *Comparative Biochemistry and Physiology B-Biochemistry & Molecular* **117**, 431 436.

Evans, D., 2008: Exercise testing in the field. In: K. Hinchcliff, R. Geor, A. Kaneps (eds), *Equine Exercise Physiology.* Saunders, Philadelphia, pp. 12 27.

Fortier, J.; Julliand, V.; Harris, P.; Goachet, A. G., 2014: Training management of Standardbred trotters: a field survey in France. *Comparative Exercise Physiology* **10**, 63 71.

Gauvreau, G.; Staempfli, H.; McCutcheon, L.; Young, S.; McDonell, W., 1995: Comparison of aerobic capacity between racing standardbred horses. *Journal of Applied Physiology* **78**, 1447 1451.

Goachet, A. G.; Fortier, J.; Julliand, V.; Assadi, H.; Lepers, R., 2011: The use of equine K4b² during incremental field exercise tests in driven Standardbred trotters: a preliminary study. In: A. Lindner (ed), *Proceedings of the Equine Nutrition and Training Conference.* Wageningen Academic Publishers, Paris, pp. 221 226.

Hargreaves, B.; Kronfeld, D.; Naylor, J., 1999: Ambient temperature and relative humidity influenced packed cell volume, total plasma protein and other variables in horses during an incremental submaximal field exercise test. *Equine Veterinary Journal* **31**, 314 318.

INRA-HN-IE, 1997: *Notation de l'état corporel des chevaux de selle et de sport.* Guide pratique. Institut de l'Elevage, Paris, France.

Kobayashi, M.; Kuribara, K.; Amada, A., 1999: Application of V200 values for

evaluation of training effects in the young Thoroughbred under field conditions. *Equine Veterinary Journal Supplement* **30**, 159 162.

Lèger, L.; Mercier, D.; Gadoury, C.; Lambert, J., 1988: The multistage 20 meter shuttle run test for aerobic fitness. *Journal of Sports Sciences* **6**, 93 101.

Levine, J., 2005: Measurement of energy expenditure. *Public Health Nutrition* **8**, 1123 1132.

Li, R.; Deurenberg, P.; Hautvast, J., 1993: A critical evaluation of heart rate monitoring to assess energy expenditure in individuals. *The American Journal of Clinical Nutrition* **58**, 602 607.

Maiolo, C.; Melchiorri, G.; Iacopino, L.; Masala, S.; De Lorenzo, A., 2003: Physical activity energy expenditure measured using a portable telemetric device in comparison with a mass spectometer. *British Journal of Sports Medicine* **37**, 445 447.

McDonough, P.; Kindig, C. A.; Erickson, H. H.; Poole, D. C., 2002: Mechanistic basis for the gas exchange threshold in Thoroughbred horses. *Journal of Applied Physiology* **92**, 1499 1505.

McDougall, J.; Wenger, H.; Green, H., 1991: *Physiological testing of the high-performance athlete*, 2th edn. Human Kinetics Brooks, Champaign, USA.

McLaughlin, J.; King, G.; Howley, E.; Bassett, D.; Ainsworth, B., 2001: Validation of the Cosmed K3 b² portable metabolic system. *International Journal of Sports Medicine* **22**, 280 284.

Persson, S., 1983: Evaluation of exercise tolerance and fitness in the performance horse. In: D. Snow, S. Persson, J. Rose (eds), *Equine Exercise Physiology*. Burlington Press, Cambridge, pp. 441 457.

Pollock, M.; Bohannon, R.; Cooper, K.; Ayres, J.; Ward, A.; White, S. R.; Linnerud, A. C., 1976: A comparative analysis of four protocols for maximal treadmill stress testing. *American Heart Journal* **92**, 39 46.

Ramsbottom, R.; Brewer, J.; Williams, C., 1988: A progressive shuttle run test to estimate oxygen uptake. *British Journal of Sports Medicine* **22**, 141 144.

Saltin, B.; Blomquist, B.; Mitchell, J.; Johnson, R.; Wildenthal, K.; Chapman, C., 1968: Response to submaximal and maximal exercise after bed rest and after training. *Circulation* **38**, 1 78.

Spurr, G.; Prentice, A.; Murgatroyd, P., 1988: Energy expenditure from minute-by-minute heart rate recording: comparison with indirect calorimetry. *American Journal of Clinical Nutrition* **48**, 552 559.

Tyler, C.; Golland, L.; Evans, D.; Hodgson, D.; Rose, R., 1996: Changes in maximum oxygen uptake during prolonged training, overtraining, and detraining in horses. *Journal of Applied Physiology* **81**, 2244 2249.

Van Erck, E.; Votion, D. M.; Serteyn, D.; Art, T., 2007: Evaluation of oxygen consumption during fiel exercise tests in Standardbred trotters. *Equine and Comparative Exercise Physiology* **4**, 43 49.

Votion, D.; Caudron, I.; Lejeune, J.; Van Der Heyden, L.; Art, T.; Van Erck, E.; Serteyn, D., 2006: New perspective for field measurement of cardiorespiratory parameters in exercising horses. *Pferdeheikunde* **5**, 619 624.

2.3.2 La détermination de la relation VO_2/FC

Les coefficients de corrélation les plus élevés ont été obtenus avec une régression de type polynomial lors des deux protocoles testés. D'après les résultats obtenus dans l'essai 2, il s'est avéré que la régression VO_2/FC obtenue lors du test T1 était plus robuste avec un r^2 moyen de 0,93 ± 0,03 (Tableau 15).

Tableau 16. Relation individuelle entre la consommation d'oxygène et la fréquence cardiaque (VO_2/FC) établie au cours des deux tests incrémentaux continus (T1 et T2) chez cinq chevaux trotteurs maintenus en condition expérimentale contrôlée.

Chevaux trotteurs	**T1**	**T2**
A		
Relation VO_2/FC	$y = -0,002x^2 + 1,29x – 111,05$	$y = 0,001x^2 - 0,159x + 15,57$
r^2	0,94	0,96
B		
Relation VO_2/FC	$y = 0,002x^2 - 0,13x + 5,68$	$y = -0,001x^2 + 0,69 – 62,19$
r^2	0,92	0,85
C		
Relation VO_2/FC	$y = 0,004x^2 - 0,91x + 72,02$	$y = -0,006x^2 + 2,75x – 272,63$
r^2	0,88	0,81
D		
Relation VO_2/FC	$y = 0,0004x^2 + 0,12x - 1,03$	$y = 0,003x^2 - 0,89x + 91,07$
r^2	0,95	0,860
E		
Relation VO_2/FC	$y = 0,0001x^2 + 0,31x – 20,06$	$y = 0,001x^2 + 0,008x + 11,49$
r^2	0,95	0,91
r^2	**0,93 ± 0,03**	**0,88 ± 0,06**

y = VO_2 exprimé en l/min, x = FC en battement par minute.

Si le design du test a une importance sur la qualité de la relation VO_2/FC, il semble que la méthode de détermination de la courbe VO_2/FC influence également la précision de cette relation. En effet, au cours d'un test incrémental, les réponses cardiorespiratoires suivent l'augmentation de vitesse. Néanmoins, à chaque changement de palier, les réponses cardiorespiratoires augmentent de manière disproportionnée à la demande durant les premiers instants du palier avant de se stabiliser. Nous avons alors testé trois méthodes de calculs pour le test T1 : 1) la première qui incluait la durée totale de chaque palier c'est à dire les trois minutes, 2) la seconde qui consistait à inclure les deux dernières minutes et enfin 3) la troisième méthode qui incluait seulement la dernière minute de chaque palier. Le

Tableau 16 présente les relations individuelles de type polynomial et les coefficients de régression pour les trois méthodes.

Tableau 17. Relations individuelles entre la consommation d'oxygène et la fréquence cardiaque (VO_2/FC) établie au cours du test incrémental T1 selon trois méthodes de calculs chez cinq chevaux trotteurs maintenus en condition expérimentale contrôlée.

Chevaux trotteurs expérimentaux	**Méthode 1 3 min**	**Méthode 2 2 min**	**Méthode 3 1 min**
A			
Relation VO_2/FC	$y = -0{,}0027x^2 + 1{,}40x - 121{,}48$	$y = -0{,}0026x^2 + 1{,}34x - 115{,}19$	$y = -0{,}0024x^2 + 1{,}29x - 111{,}05$
r^2	0,92	0,96	0,94
B			
Relation VO_2/FC	$y = 0{,}0016x^2 - 0{,}09x - 0{,}96$	$y = 0{,}0014x^2 - 0{,}08 + 2{,}29$	$y = 0{,}0016x^2 - 0{,}13x + 5{,}68$
r^2	0,89	0,92	0,92
C			
Relation VO_2/FC	$y = 0{,}0024x^2 - 0{,}36x + 21{,}72$	$y = 0{,}0049x^2 - 1{,}31x + 110{,}99$	$y = 0{,}0039x^2 - 0{,}91x + 72{,}02$
r^2	0,92	0,89	0,88
D			
Relation VO_2/FC	$y = -0{,}0001x^2 + 0{,}29x - 15{,}93$	$y = 0{,}0001x^2 + 0{,}22x - 8{,}70$	$y = 0{,}0004x^2 + 0{,}12x - 1{,}03$
r^2	0,89	0,94	0,95
E			
Relation VO_2/FC	$y = -0{,}0003x^2 + 0{,}49x - 38{,}06$	$y = 0{,}0003x^2 + 0{,}26x - 14{,}52$	$y = 0{,}0001x^2 + 0{,}31x - 20{,}06$
r^2	0,94	0,96	0,95
r^2	**0,91 ± 0,02**	**0,93 ± 0,03**	**0,93 ± 0,03**

$y = VO_2$ exprimé en l/min, x = FC en battement par minute.

Ces résultats sont en accord avec les précédents travaux menés en physiologie humaine (Erdogan *et al.*, 2010) et en équine (Evans et Rose, 1988), où compte tenu du temps nécessaire pour atteindre un état d'équilibre, les premiers instants des paliers sont couramment exclus des analyses. Dans nos conditions, il semblerait que nos données aient mis environ une minute à se stabiliser, puisque les méthodes 2 et 3 présentent des r^2 moyens similaires et supérieurs à celui obtenu avec la méthode 1. Chez l'homme, Spurr *et al.* (1988) proposaient déjà de ne garder que la dernière minute de chaque palier lors d'un test incrémental pour établir la relation VO_2/FC. Nous avons ainsi opté pour ce choix.

CHAPITRE 3

Quantification de la dépense énergétique liée aux exercices

Afin de répondre à l'objectif principal de thèse, nous avons mené deux essais. Dans un premier temps, nous avons quantifié la dépense énergétique au cours des exercices d'entraînement chez le cheval trotteur à partir de la consommation d'oxygène et dans un second temps, nous avons comparé deux méthodes de quantification énergétique.

3.1 La quantification de la dépense énergétique d'exercice à partir de mesures de VO_2

L'objectif de ce travail était de quantifier la dépense d'énergie occasionnée par les quatre exercices spécifiques utilisés dans l'entraînement des chevaux trotteurs identifiés dans l'essai 1a. Les chevaux trotteurs maintenus en condition expérimentale contrôlée ont été soumis aux exercices promenade, jogging, parcours et interval. Bien qu'une partie de nos chevaux expérimentaux n'ait jamais été qualifiée, nous avons choisi de nous rapprocher des exercices d'entraînement appliqués à une catégorie de chevaux d'âge similaire.

3.2 La comparaison de méthodes de quantification de la dépense énergétique liée à l'exercice : mesures directes de VO_2 *vs.* VO_2 estimée à partir de mesures de FC

L'objectif de cet essai était de quantifier la dépense énergétique, basée sur des mesures de terrain de consommation d'oxygène et de fréquence cardiaque utilisant la relation individuelle VO_2/FC, au cours des quatre exercices utilisés dans l'entraînement des chevaux trotteurs. Pour cela les chevaux trotteurs maintenus en condition expérimentale contrôlée ont réalisé deux tests préliminaires, le test v500 pour déterminer la v500 (et donc l'intensité des différents exercices) et le test incrémental T1 pour étalonner la courbe VO_2/FC du moment de chaque cheval.

3.3 Les résultats et discussion

3.1.1 La quantification de la dépense énergétique au cours des exercices d'entraînement

Ce travail a été valorisé sous la forme d'une publication soumise et acceptée à Animal, DOI:10.1017/S1751731114003139. Les données de chaque cheval obtenues au cours de cette étude sont présentées en Annexes 3, 4, 5.1, 5.2, 6.1, 6.2 et 7.

Publication 3

Quantification of the energy expenditure during training exercises in Standardbred trotters

J Fortier, G Deley, AG Goachet and V Julliand

Animal, 2014, article sous presse, DOI:10.1017/S1751731114003139.

Animal, 00, Page 1 of 7 © The Animal Consortium 2014
doi:10.1017/S1751731114003139

AUTHORS PROOF
NOT FOR DISTRIBUTION

Quantification of the energy expenditure during training exercises in Standardbred trotters

J. Fortier[1†], G. Deley[2], A.-G. Goachet[1] and V. Julliand[1]

[1]*URANIE–USC1335 Nutrition du cheval athlète, AgroSup Dijon, 26 bd Dr Petitjean, BP 87999, 21079 Dijon cedex, France;* [2]*Centre d'Expertise de la Performance, Faculté des Sciences du Sport, 21000 Dijon, France*

(Received 31 March 2014; Accepted 19 November 2014)

An appropriate energy feeding management that ensures the optimal dietary energy supply according to the energy expenditure (EE) is a crucial component for the horse's performance. The main purpose of this study was to determine the EE during four specific exercises used in the training of Standardbred trotters (promenade, jogging, parcours and interval work-outs). A total of six Standardbred geldings performed four different testing situations on a track. The intensity (expressed in percentage of the maximal velocity over 500 m, i.e. v500) and volume (distance and duration) of the testing situations were determined according to practices reported by French trainers. Promenade and jogging included only an exercise phase, whereas parcours and interval situations also included a warm-up and a recovery phase. Oxygen uptake (VO_2), carbon dioxide production (VCO_2) and heart rate (HR) were continuously recorded from 2 min before the beginning through to the end of the testing situations, using a portable respiratory gas analyser. Blood lactate levels and rectal temperature were determined before and immediately after the exercise phase of each testing situations. EE of the different phases (warm-up, exercise and recovery) and EE of the entire testing situations (EE_{TOTAL}) were calculated from VO_2 measurements and the O_2 caloric equivalent. Interval and parcours situations induced higher physiological responses than promenade and jogging situations, particularly in terms of VO_{2peak}, VCO_{2peak} and HR_{peak}. The highest blood lactate concentration (6 mmol/l) was measured after the interval exercise, and respiratory exchange ratios ⩾1 were observed only for the parcours situation. The EE of exercise phase varied from 0.49 to 1.79 kJ/min per kg for promenade and parcours situations. The EE of warm-up and recovery phases did not differ between parcours and interval situations, and was estimated at 1.04 and 0.57 kJ/min per kg BW, respectively. On average, the warm-up and the recovery phases contributed to 38% and 19% of the EE_{TOTAL}. For promenade, jogging, parcours and interval situations, EE_{TOTAL} was evaluated at 12 618, 11 119, 13 698 and 18 119 kJ, respectively.

Keywords: energy expenditure, oxygen uptake, work out, horses

Implications

The present study confirms the feasibility and relevance of field cardiorespiratory measurements in exercising horses using a portable gas analyser and opens new perspectives on the assessment of physiological responses and energy expenditure in horses exercising in real-life conditions. It provides the first estimations of the energy expenditure induced by specific training exercises in trotters. This is a start point to estimate weekly and daily amount of energy expenditure induced by physical activity for assessing accurate energy balance in equine athletes.

Introduction

Appropriate energy feeding management is a crucial component of a race horse's performance. An accurate balance between dietary energy supply and energy expenditure (EE) has to be ensured for health and performance (Lawrence, 2009). Thus, the amount of energy used in training needs to be properly quantified (Asai *et al.*, 1999; National Research Council, 2007). This amount is directly related to the volume and intensity of the exercise during the training session. Volume is defined as the total quantity of activity performed during an exercise, expressed as duration or distance (Viru and Viru, 2000), whereas intensity reflects the qualitative component of work in relation to power output or velocity according to each subject. Intensity is usually expressed as a function of individual capacity such as maximum velocity ($\%v_{max}$) or maximal oxygen consumption ($\%VO_{2max}$) (Bompa and Haff, 2009).

The current energy recommendations for race horses (NRC, 2007; Martin-Rosset, 2012) are not based on precise quantification of EE during specific exercises of their typical

† E-mail: j.fortier@agrosupdijon.fr

training, although some of them have been studied. Thus, in Standardbred trotters, four main specific exercises are commonly used by Standardbred trainers as follows: promenade-, jogging-, parcours- and interval-type exercises (Sommaire, 2007; Wegener *et al.*, 2012; Fortier *et al.*, 2014). Quantifying the amount of energy expended during each of these four main specific exercises would allow improving dietary recommendations. In human athletes, respiratory gas measurements are widely used to estimate EE during work-out (Bertuzzi *et al.*, 2007). In horses, the recent development of portable systems adapted from human application offers the opportunity to measure gas exchange and oxygen consumption (VO_2) in field conditions of a wide variety of activities (Art *et al.*, 2006; Votion *et al.*, 2006; Goachet *et al.*, 2011). This opens new perspectives for the quantification of the amount of energy expended by horses during training.

This study aimed to quantify EE, based on field measurements of oxygen consumption, during four specific exercises – that is, promenade, jogging, parcours and interval in Standardbred trotters training.

Material and methods

The project was conducted under the ethics committee of animal experimentation Grand Campus Dijon (France) approval 0313.

Horses and management of horses

A total of six Standardbred trotter geldings with an average age of 7.8 ± 1.9 years, a mean BW of 478 ± 25 kg and a mean body condition score (BCS) of 3.0 ± 0.0 (on a scale of 0 to 5, INRA-HN-IE, 1997) were maintained under controlled conditions. They were housed separately in 4 × 3.5 m free stalls, on straw bedding, and were allowed access to sandy paddocks for free exercise for 2 h daily. Horses were weighted (PM700; Chauny, France) and their BCS were recorded weekly throughout the study.

Clean potable drinking water and a block of trace-mineralized salts were offered *ad libitum*. Horses were fed meadow hay representing ~60% of the daily dry matter (DM) intake (1200 g DM/100 kg BW) and pelleted feed (800 g DM/100 kg BW) (DP Puissance; InVivo NSA, Louhans, France). Hay was fed at 1000 and 1700 h. Pelleted feed was fed at 0800 and 1730 h. The portions at each feeding were equal.

Before the measurements, horses received a conditioning programme for 8 weeks consisting of the following four work-outs per week: two treadmill exercises (Horse-Gym 2000, GmbH, Harburg-Großsorheim, Germany) for 24 or 32 min at 0% incline at 2.2 m/s and two field exercises on a 1150-m sandy track. Trotters were driven by the same person according to a training programme, which included jogging (25 to 35 min at 5.5 to 6.2 m/s), parcours (2000 to 3500 m at 6.9 to 7.8 m/s) and interval exercises (5 × 900 m at 7.5 to 8.3 m/s or 4 × 500 m at 9.7 m/s). Parcours and interval exercises were preceded by a 10-min warm-up (or heat) at a velocity ranging from 5.5 to 6.9 m/s and ended with a cooling-down, which consisted of 2000 m at 4.2 m/s.

Experimental design

All the trotters were driven by the same person throughout the experiment. After the conditioning period, horses performed a v500 test before accomplishing four different testing situations, each of them separated from the previous one by 1 week in order to avoid fatigue. For practical purposes, the intensity of exercises was expressed as a percentage of v500, in order to adapt the intensity of the four testing situations for each individual (previously evaluated in racing Standardbred trotters – Fortier, unpublished data) according to their capacities. Subsequently, the horses performed the promenade, jogging, parcours and interval exercises in order to determine the respective EE.

Exercise protocol and measurements

The v500 test, entirely performed at trot, consisted of three bouts of 500 m, separated by 500 m of active recovery (at 4.2 m/s). It was preceded by a 10-min warm-up at 5.6 m/s followed by a 10-min recovery at slow trot and at walk. Duration, velocity and heart rate (HR) were continuously recorded using a stopwatch, a tachometer attached to the wheel of the sulky and an HR monitor (Polar; Polar Electro Oy, Kempele, Finland). The highest velocity recorded during the best bout for each horse was considered as the maximal velocity over 500 m at trot (v500).

At least 1 week after the v500 test, trotters randomly performed promenade, jogging, parcours and interval exercises (Table 1). Duration and distance of the different exercises were set according to current training practices of French Standardbred trainers (Fortier *et al.*, 2014). The parcours and interval exercises included a warm-up (wu) and a recovery phase (rec), whereas the promenade and jogging only included an exercise phase (ex). The exercise phase of the interval exercise consisted of the repetition of five 907-m high-intensity bouts (79% of v500), interspersed with 2-min low-intensity phases (20% of v500).

Table 1 *Characteristics of the four testing situations*

	Promenade	Jogging	Parcours	Interval
Warm-up				
% of v500			48	48
Duration (min)			12	12
Distance (m)			4060	4060
Exercise				
% of v500	37	51	74	79/20
Duration (min)	53	30	5'40	1'36/1'58
Distance (m)	13 700	10 600	2970	907/150
Bout	1	1	1	5
Recovery				
% of v500			38	38
Duration (min)			9'1	9'1
Distance (m)			2250	2250

Description of the promenade, jogging, parcours and interval situations, and their different phases – that is, warm-up, exercise and recovery. For each phase, the intensity (expressed as percentage of the maximal velocity over 500 m i.e. v500), the duration (min) and the distance (m) were specified, as the number of bout for the exercise phase.

Throughout the four testing situations, VO_2 and carbon dioxide production (VCO_2) were measured breath-by-breath with the portable gas analyser (K4b²; Cosmed, Rome, Italy) (Supplementary Figure S1). Before each test, the O_2 and CO_2 analysers were calibrated by a 2-point calibration. The first one was that ambient air was assumed to have a fractional oxygen concentration of 20.9% and a fractional carbon dioxide of 0.03%, and the second one a gas of known concentration with 16% of O_2 and 5% CO_2 was assumed. A pretest, specified by the manufacturer, was used to establish a delay calibration between airflow and gas signals. The analyser and battery were fixed on the sulky and a headcheck was placed on trotters in order to protect the face mask against shocks (Goachet *et al.*, 2011). HR was recorded continuously using the Polar system incorporated to the K4b² system during each testing situation. In addition, venous blood was collected at rest before testing situation and immediately after each exercise phase to determine blood lactate concentration pre ($[La^-]$ pre) and post ($[La^-]$ post) testing situations. Blood samples were taken via venipuncture of the jugular vein into one 5-ml pre-treated potassium oxalate/sodium fluoride tubes. Plasma for the measurement of $[La^-]$ was obtained by centrifugation of the tubes ($450 \times g$ for 10 min) and was transferred into new dry tubes. All tubes were then frozen (at −20°C) and sent to Frank Duncombe Laboratory (Caen, France) for analysis by enzymatic colorimetric method (kits No. LC 2653; Randox, Crumlin, UK). The rectal temperature (T°) was also measured at rest before testing situation (T° pre) and immediately after exercise phase (T° post) for each testing situation. The total duration of each testing situation and their different phases were timed with a chronometer.

Calculations

The data recorded during the testing situations were downloaded using the K4b² management data software (Cosmed, Rome, Italy). Cardiorespiratory responses were filtered and averaged over 5 s, and the curves were smoothed with a 3-point index (Duffield *et al.*, 2004). The different phases – that is, wu, ex and rec – of the testing situations were identified by comparing the recorded time for each phase and time indicated by VO_2 recordings. Data were then transferred to Excel files to convert VO_2 and VCO_2 into ml/min per kg and to calculate the respiratory exchange ratio (RER) as VCO_2 (l/min)/VO_2 (l/min). Oxygen uptake at rest (VO_{2rest}) was defined as the mean of the last 30 s of the rest period before the beginning of the testing situations with horses not moving. Mean VO_2, VCO_2, RER and HR during the exercise phase (VO_{2ex}, VCO_{2ex}, RER_{ex} and HR_{ex}) were defined as the means of VO_2, VCO_2, RER and HR, respectively, measured throughout exercise phases of the four testing situations. Mean VO_2, VCO_2, RER and HR during warm-up (VO_{2wu}, VCO_{2wu}, RER_{wu} and HR_{wu}) and recovery (VO_{2rec}, VCO_{2rec}, RER_{rec} and HR_{rec}) were defined as means of VO_2, VCO_2, RER and HR, respectively, measured throughout warm-up and recovery phases of parcours and interval situations. VO_{2peak}, VCO_{2peak}, RER_{peak} and HR_{peak}, as the means of VO_2, VCO_2, RER and HR, respectively, obtained over the last 30 s of the exercise phase of each testing situation, were also measured.

To calculate EE related to exercise, VO_{2rest} was subtracted from the VO_{2wu}, VO_{2ex} and VO_{2rec}. A caloric equivalent of 20.9 kJ/l O_2 was used to convert VO_2 into energy (Bertuzzi *et al.*, 2007; Mello *et al.*, 2009). EE of the different phases (EE_{wu}, EE_{ex} and EE_{rec}) and EE of the entire testing situations (i.e. $EE_{wu} + EE_{ex} + EE_{rec}$), expressed in kJ, were calculated for promenade, jogging, parcours and interval situations. The contributions of warm-up ($\%EE_{wu}$), exercise ($\%EE_{ex}$) and recovery ($\%EE_{rec}$) phases to the $EE_{parcours}$ and $EE_{interval}$ were also determined.

Statistical analysis

All measurements were expressed as mean ± s.d. Comparisons of the cardiorespiratory variables and EE variables among the four testing situations were made by ANOVA for repeated measures, with the Student–Newman–Keuls test performed to detect specific differences. Effect sizes (η^2) were also determined, with values of 0.2, 0.5, 0.8 and >1.3 considered to represent small, medium, large and very large differences, respectively (Cohen, 1988). Differences were considered statistically significant at $P < 0.05$.

Results

During the v500 test, the highest velocity recorded during the best bout, considered as the maximal velocity over 500 m at trot, was 11.7 ± 0.7 m/s. During this bout, the HR peak was 214 ± 4 bpm.

VO_{2rest} was 3.0 ± 0.9 ml/min per kg BW. No significant difference was detected between physiological data during warm-up and recovery phases of parcours and interval situations, except RERs, which were higher for the parcours situation (Table 2). EE_{wu} represented 43.6 ± 5.6% and 33.3 ± 3.3% of the EE of parcours and interval situations, respectively, which were not significantly different ($P > 0.05$). EE_{rec} represented 21.4 ± 6.3% and 16.5 ± 2.5% of the $EE_{parcours}$ and $EE_{interval}$ situations, respectively, which were not significantly different ($P > 0.05$) (Table 3).

VO_{2ex} and HR_{ex} were significantly different between the four testing situations (Table 2). VO_2, VCO_2 and HR peak responses were higher for parcours than for promenade ($P < 0.05$, *very large differences* with $\eta^2 = 2.78$, $\eta^2 = 3.31$ and $\eta^2 = 2.40$ for VO_{2peak}, VCO_{2peak} and HR_{peak}, respectively) and jogging situations ($P < 0.05$, *very large differences* with $\eta^2 = 2.50$, $\eta^2 = 2.82$ and $\eta^2 = 3.84$ for VO_{2peak}, VCO_{2peak} and HR_{peak}, respectively). VO_2, VCO_2 and HR peak responses were higher for interval than for promenade ($P < 0.05$, *very large differences* with $\eta^2 = 4.12$, $\eta^2 = 3.24$ and $\eta^2 = 2.50$ for VO_{2peak}, VCO_{2peak} and HR_{peak}, respectively) and jogging situations ($P < 0.05$, *very large differences* with $\eta^2 = 2.36$, $\eta^2 = 2.47$ and $\eta^2 = 3.78$ for VO_{2peak}, VCO_{2peak} and HR_{peak}, respectively). RER_{ex} and RER_{peak} for parcours situation was higher compared with promenade ($P < 0.05$, *very large differences* with $\eta^2 = 2.50$ and $\eta^2 = 3.29$ for RER_{ex} and RER_{peak}, respectively), jogging ($P < 0.05$, *large and very large differences* with $\eta^2 = 1.09$ and $\eta^2 = 2.75$ for RER_{ex} and

Table 2 *Physiological responses of Standardbred trotters during the four testing situations*

	Promenade	Jogging	Parcours	Interval	*P* value (testing situation)
VO_{2wu} (ml/min per kg BW)	–	–	49.4 ± 9.1	55.9 ± 7.7	0.236
VO_{2ex} (ml/min per kg BW)	30.9 ± 4.3^{a}	49.9 ± 4.8^{b}	89.6 ± 21.6^{c}	64.7 ± 12.1^{d}	<0.0001
VO_{2peak} (ml/min per kg BW)	41.0 ± 3.1^{a}	47.7 ± 7.4^{a}	93.2 ± 24.6^{b}	92.8 ± 17.5^{b}	<0.0001
VO_{2rec} (ml/min per kg BW)	–	–	33.0 ± 10.1	38.6 ± 6.2	0.129
VCO_{2wu} (ml/min per kg BW)	–	–	47.1 ± 8.9	42.4 ± 6.7	0.372
VCO_{2ex} (ml/min per kg BW)	31.9 ± 3.7^{a}	42.0 ± 4.3^{ab}	90.8 ± 23.0^{c}	55.2 ± 13.1^{b}	<0.0001
VCO_{2peak} (ml/min per kg BW)	33.0 ± 3.4^{a}	41.2 ± 7.6^{a}	99.4 ± 28.2^{b}	76.5 ± 18.7^{c}	<0.0001
VCO_{2rec} (ml/min per kg BW)	–	–	33.7 ± 8.7	29.7 ± 6.2	0.271
RER_{wu}	–	–	0.96 ± 0.08^{a}	0.76 ± 0.04^{b}	0.002
RER_{ex}	0.83 ± 0.04^{a}	0.90 ± 0.12^{a}	1.02 ± 0.10^{b}	0.90 ± 0.05^{a}	0.004
RER_{peak}	0.81 ± 0.05^{a}	0.86 ± 0.04^{a}	1.07 ± 0.10^{b}	0.82 ± 0.05^{a}	<0.0001
RER_{rec}	–	–	1.07 ± 0.12^{a}	0.79 ± 0.05^{b}	0.007
HR_{wu} (beat/min)	–	–	156 ± 12	161 ± 13	0.526
HR_{ex} (beat/min)	134 ± 17^{a}	149 ± 19^{b}	188 ± 12^{c}	169 ± 12^{d}	<0.0001
HR_{peak} (beat/min)	153 ± 22^{a}	145 ± 15^{a}	194 ± 10^{b}	198 ± 13^{b}	<0.0001
HR_{rec} (beat/min)	–	–	140 ± 5	138 ± 10	0.717
[La^{-}] pre (mmol/l)	0.4 ± 0.1	0.4 ± 0.1	0.4 ± 0.2	0.4 ± 0.1	0.223
[La^{-}] post (mmol/l)	0.7 ± 0.4^{a}	0.4 ± 0.2^{a}	5.3 ± 5.1^{b}	6.0 ± 5.3^{b}	0.009
T° pre (°C)	37.4 ± 0.2	37.2 ± 0.3	37.0 ± 0.3	37.1 ± 0.1	0.014
T° post (°C)	38.3 ± 0.3^{a}	38.5 ± 0.2^{ab}	38.8 ± 0.4^{b}	39.5 ± 0.5^{c}	<0.0001

Oxygen uptake during warm-up (VO_{2wu}), exercise (VO_{2ex}), recovery (VO_{2rec}) and at peak (VO_{2peak}) during promenade, jogging, parcours and interval; carbon dioxide production during warm-up (VCO_{2wu}), exercise (VCO_{2ex}), recovery (VCO_{2rec}) and at peak (VCO_{2peak}) during promenade, jogging, parcours and interval; respiratory exchange ratio warm-up (RER_{wu}), exercise (RER_{ex}), recovery (RER_{rec}) and at peak (RER_{peak}) during promenade, jogging, parcours and interval; heart rate during warm-up (HR_{wu}), exercise (HR_{ex}), recovery (HR_{rec}) and at peak (HR_{peak}) during promenade, jogging, parcours and interval; [La^{-}] pre = blood lactate concentration before testing situations; [La^{-}] post = post-exercise phase blood lactate concentration; T° pre = rectal temperature before testing situations; T° post = post-exercise phase rectal temperature.
Data are reported as means and s.d. ($n = 6$).
^{a,b,c,d}Values within a row with different superscripts differ significantly at $P < 0.05$.

Table 3 *Estimation of energy expended in six Standardbreds submitted to four different testing situations*

	Promenade	Jogging	Parcours	Interval	*P* value (testing situations)
EE_{wu} (kJ/min per kg BW)	–	–	1.04 ± 0.20	1.05 ± 0.24	0.817
EE_{ex} (kJ/min per kg BW)	0.49 ± 0.11^{a}	0.78 ± 0.12^{ab}	1.79 ± 0.43^{c}	1.18 ± 0.19^{b}	<0.0001
EE_{rec} (kJ/min per kg BW)	–	–	0.56 ± 0.23	0.58 ± 0.16	0.217
EE (kJ/min per kg BW)	0.49 ± 0.11^{a}	0.78 ± 0.12^{b}	0.76 ± 0.17^{b}	0.79 ± 0.15^{b}	0.013
EE (kJ)	12 618 ± 2883^{a}	11 119 ± 999^{a}	13 698 ± 2676^{a}	18 119 ± 3417^{b}	0.001

EE_{wu} = warm-up energy expressed in kJ/min per kg BW; EE_{ex} = exercise energy expressed in kJ/min per kg BW; EE_{rec} = recovery energy expressed in kJ/min per kg BW; **EE** (kJ/min per kg BW) = energy expenditure ($EE_{wu} + EE_{ex} + EE_{rec}$) per kg of BW and per min for the four testing situations; **EE** (kJ) = energy expenditure for the four testing situations
Data are reported as means and s.d. ($n = 6$).
^{a,b,c,d}Values within a row with different superscripts differ significantly at $P < 0.05$.

RER_{peak}, respectively) and with interval situations ($P < 0.05$, *very large differences* with $\eta^2 = 1.52$ and $\eta^2 = 3.16$ for RER_{ex} and RER_{peak}, respectively). [La^{-}] at the end of the exercise phase of parcours and interval situations was higher than for promenade ($P < 0.05$, *very large differences* with $\eta^2 = 1.27$ and $\eta^2 = 1.41$ for parcours and interval, respectively) and jogging situations ($P < 0.05$, *very large differences* with $\eta^2 = 1.36$ and $\eta^2 = 1.49$ for parcours and interval, respectively). T° post exercise was higher for interval than promenade ($P < 0.05$, $\eta^2 = 2.91$, *very large differences*), jogging ($P < 0.05$, $\eta^2 = 2.63$, *very large differences*) and parcours situations ($P < 0.05$, $\eta^2 = 1.55$, *very large differences*). EE_{ex} increased from the promenade to parcours situations (Table 3). When expressed in kJ/min per kg BW, the EE of the promenade situation was lower compared with jogging ($P < 0.05$, $\eta^2 = 0.69$, *medium differences*), parcours ($P < 0.05$, $\eta^2 = 0.39$, *small differences*) and interval situations ($P < 0.05$, $\eta^2 = 1.74$, *large differences*). Expressed in kJ, $EE_{interval}$ was significantly higher than promenade ($P < 0.05$, $\eta^2 = 2.28$, *very large differences*), jogging ($P < 0.05$, $\eta^2 = 0.07$, *medium differences*) and parcours situations ($P < 0.05$, $\eta^2 = 1.19$, *large differences*).

Discussion

This study showed that in Standardbred trotters' training, interval exercises induced a total EE (18 119 kJ) that was

1.3-, 1.4- and 1.6-fold higher than that of jogging, promenade and parcours situations, respectively. Despite different cardiorespiratory responses, these last three exercises appeared to be relatively close in terms of EE (11 119, 12 618 and 13 698 kJ, respectively).

In the context of EE assessment during exercise, field metabolic measurements have the great advantage to take into account the genuine training conditions such as the extra load of the rider or sulky or the ground surface effect (Lawrence, 2009) compared with treadmill conditions. In fact, it is generally accepted that treadmill exercise does not always reflect the demands in field conditions, with physiological and mechanical responses of harnessed trotters lower in treadmill than in field conditions (Barrey *et al.*, 1993; Couroucé *et al.*, 1999). Accordingly, although the physiological responses observed in the present study are different from common physiological data reported in standardbred trotters exercising on treadmills (Art and Lekeux, 1995), they were concordant with previous reports obtained in field studies (van Erck *et al.*, 2007; Goachet *et al.*, 2011) and likely reflected the metabolic demand of the different exercises performed.

As expected, the cardiorespiratory responses during promenade, jogging, parcours and interval situations varied according to the characteristics of testing situations. As mentioned previously (Fortier *et al.*, 2014), Standardbred trainers indicated that they use promenade and jogging exercises to develop aerobic endurance and to optimize active recovery, which is confirmed by the physiological responses observed in the present study: VO_{2ex} values were 30.9 and 49.9 ml/min per kg BW for promenade and jogging situations, respectively; HR_{ex} remained <150 bpm for both the testing situations. Moreover, the post-exercise blood lactate levels remained below 1 mmol/l (0.7 ± 0.4 and 0.4 ± 0.2 mmol/l for the promenade and jogging situations, respectively) and the RER remained below 1 (0.81 ± 0.05 and 0.86 ± 0.04 for the promenade and jogging situations, respectively), indicating a large aerobic contribution during promenade and jogging situations. On the other hand, to develop specific physical capacities (speed and strength), French trainers utilize more intense type of exercises – that is, parcours and interval exercises. Interestingly, although the parcours induced higher mean responses than interval exercises during the exercise phase, they induced similar responses regarding peak results of HR, VO_2, VCO_2 and [La^-]. This underlines the physiological effect of continuous *v.* intermittent exercises. In fact, it is well documented in humans that intermittent exercise can result in greater volume of exercise compared with continuous exercise (Wilmore *et al.*, 2009). This greater volume is possible only if the mean intensity of the exercise phase is reduced (by interspersed periods of low intensity between high intense short bouts). In our testing situation, the mean intensity of exercise interval was 50% of v500 (i.e. mean of 79% of v500 for high bouts and 20% of v500 for slow bouts). Our results confirmed that interval exercise allows increasing the volume of exercise and also the total time duration spent at high physiological responses, certifying the great interest of discontinuous exercise in training.

According to our VO_2 measurements, the exercise phases conducted at various intensities (3.9 to 8.7 m/s) induced EE between 0.49 ± 0.11 and 1.79 ± 0.43 kJ/min per kg BW. The estimation of EE at exercise appeared dependent to the contribution of the energy systems – that is, the aerobic and anaerobic contributions to the total EE. If the aerobic component of energy production can be readily calculated from the VO_2 values during exercises, the absence of a method universally accepted for the measurement of the anaerobic metabolism during exercise, especially in non-laboratory tests, is still an unsolved problem. Different methods emerged from human application, such as the energy equivalent to lactate concentration (di Prampero and Ferretti, 1999). In the equine exercise physiology, although blood lactate energy equivalent for horses does not exist, it is used as an indicator of released anaerobic energy (Pösö *et al.*, 1993; Gottlieb-Vedi *et al.*, 1995; Eaton *et al.*, 1999). In our study, blood lactate levels measured after the exercises indicated lower anaerobic lactic contributions during promenade and jogging situations. Concerning parcours and interval situations, the [La^-] values post the exercise phase were 5.3 ± 5.1 and 6.0 ± 5.3 mmol/l, respectively, which were relatively low compared with the highest values reported in race horses (~24 mmol/l for Standardbred horses; Pösö *et al.*, 1995). Moreover, as reported by Eaton (1994), races from 1600 to 2400 m in trotters induced a predominately aerobic contribution to the total energy, estimated to be ~80% to 85%, and the rest (15% to 20%) was released by anaerobic pathways. Tyler *et al.* (1996) confirmed this finding and indicated that the aerobic contribution to total energy requirement in trained Standardbred horses was 72% during sprint exercise (performed at 115% of VO_{2max}). As our exercises were submaximal, we hypothesized that the aerobic metabolism was dominant during the four testing situations, whereas a possible underestimation of the total EE (aerobic and anaerobic contributions) was suspected for parcours and interval situations. Indeed, although this underestimation could reach ~20% for interval and parcours situations, our EE results were consistent with previous research. Meixner *et al.* (1981) estimated EE values that varied from 0.8 to 2.6 kJ/min per kg BW during exercise completed at various intensities (from 3.3 to 8.3 m/s) at trot for horses ridden, carrying a 100 kg load. Moreover, Pagan and Hintz (1986) concluded similar results, which varied from 0.8 to 1.9 kJ/min per kg BW at various gaits in horses ridden by a 50-kg rider. In Standardbred trotters pulling a sulky and a driver (80 kg), Martin-Rosset (2012) estimated an EE value from 1.0 to 2.3 kJ/min per kg BW for exercises undertaken at 5.0 and 8.3 m/s, respectively, from an equation that permitted an estimation of oxygen consumption, previously established by Gottlieb-Vedi *et al.* (1991), and estimated anaerobic contribution.

Moreover, to assess EE during exercise, we investigated the different phases that composed each testing situation. In our warm-up conditions – that is, only one heat – the warm-up contributes to $43.6 \pm 5.6\%$ and $33.3 \pm 3.3\%$ to the EE_{TOTAL} for parcours and interval situations, respectively, which represented

~6000 kJ. However, in practice, 50% of trainers undertook either one or two heats (Fortier *et al.*, 2014), which represented supplementary EE and impacted the energy contribution during the subsequent exercise phase. In horses, it was indicated that the warm-up increased the aerobic energy contribution to total EE (McCutcheon *et al.*, 1999) due to the much faster rate of increase in VO_2 at the beginning of the exercise phase (Tyler *et al.*, 1996). Moreover, the recovery phase also added supplementary EE, representing about $21.4 \pm 6.3\%$ and $16.5 \pm 2.5\%$ to the EE_{TOTAL} of parcours and interval situations, respectively. Interestingly, the EE observed during the recovery phases was similar during the two exercises, which is in agreement with Langsetmo and Poole (1999), who indicated that the post-exercise oxygen uptake was independent of the preceding exercise intensity. However, as the recovery phase of exercise is often transient and minimal, the physiological recovery could last several hours after exercise (Bompa and Haff, 2009). This is why it could be of interest to investigate VO_2 and EE during the complete warm-up phase and over a longer period post exercise in order to determine the EE in exercising horses.

In conclusion, although yielding different cardiorespiratory responses, the promenade, jogging and parcours situations induced the same EE when expressed in kJ. Although trainers often considered only parcours and interval situations as 'real work' (Fortier *et al.*, 2014), it seems that in terms of energy the promenade and jogging situations also represent an important component, confirming that the combinations of intensity and volume of exercise and its different phases are fundamental for the assessment of EE.

The data obtained in the present study established the first estimations of weekly and daily amounts of aerobic energy induced by physical activity in trotters, according to the weekly frequency of exercises reported previously (Fortier *et al.*, 2014).

Although they should be considered with caution, given the small number of horses tested, our results are the first to provide figures of the amount of aerobic energy utilized during training, ~80 400 kJ/week or 11 500 kJ/day. Further investigation is necessary to confirm our data using more horses for estimating the anaerobic energy contribution, as well as the energy from additional physical activities (such as treadmill exercises, horse walker sessions or races). Despite these limitations, our estimations of energy cost related to physical activity should be added to the maintenance requirements to determine the daily energy requirements of exercising horses. This indeed contributes to assess energy balance in the nutrition of trotters.

Acknowledgements

This study was supported by Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) Department Physiologie Animale et Systèmes d'Elevage (PHASE), the Burgundy Region and AgroSup Dijon. Authors acknowledge the trainers of horses and the staff of Unité de Recherche sur les ANImaux de l'Elevage (URANIE) for their active participation.

Supplementary materials

For supplementary materials referred to in this article, please visit http://dx.doi.org/10.1017/S1751731114003139

References

Art T and Lekeux P 1995. Ventilatory and arterial blood gas tension adjustments to strenuous exercise in Standardbreds. American Journal of Veterinary Research 56, 1332–1337.

Art T, Duvivier DH, van Erck E, de Moffarts B, Votion D, Bedoret D, Lejeune JP, Lekeux P and Serteyn D 2006. Validation of a portable equine metabolic measurement system. Equine Veterinary Journal. Supplement 36, 557–561.

Asai Y, Matsui A, Osawa T, Kawai M and Kondo S 1999. Digestible energy expenditure in grazing activity horses. Equine Veterinary Journal. Supplement 30, 490–492.

Barrey E, Galloux P, Valette JP, Auvinet B and Wolter R 1993. Stride characteristics of overground versus treadmill locomotion in the saddle horse. Acta Anatomica 146, 90–94.

Bertuzzi R, Franchini E, Kokubun E and Kiss M 2007. Energy system contributions in indoor rock climbing. European Journal of Applied Physiology 101, 293–300.

Bompa TO and Haff GG 2009. Periodization: theory and methodology of training, 5th edition. Human Kinetics, Stanningley, UK.

Cohen J 1988. Statistical power analysis for the behavioral sciences, 2nd edition. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, NJ.

Couroucé A, Geffroy O, Barrey E, Auvinet B and Rose R 1999. Comparison of exercise tests in French trotters under training track, racetrack and treadmill conditions. Equine Veterinary Journal. Supplement 30, 528–532.

di Prampero P and Ferretti G 1999. The energetics of anaerobic muscle metabolism: a reappraisal of older and recent concepts. Respiration Physiology 118, 103–115.

Duffield R, Dawson B, Pinnington H and Wong P 2004. Accuracy and reliability of a Cosmed K4b^2 portable gas analysis system. Journal of Science and Medicine in Sport 7, 11–22.

Eaton M 1994. Energetics and performance. In The athletic horse: principles and practice of equine sports medicine (ed. D Hodgson and R Rose), pp. 49–61. Saunders Company, Philadelphia, PA, USA.

Eaton M, Hodgson D, Evans D and Rose R 1999. Effects of low- and moderate-intensity training on metabolic responses to exercise in Thoroughbreds. Equine Veterinary Journal. Supplement 30, 521–527.

Fortier J, Julliand V, Harris P and Goachet AG 2014. Training management of Standardbred trotters: a field survey in France. Comparative Exercise Physiology 10, 63–71.

Goachet A, Fortier J, Julliand V, Assadi H and Lepers R 2011. The use of equine K4b^2 during incremental field exercise tests in driven Standardbred trotters: a preliminary study. In Proceedings of the Equine Nutrition and Training Conference (ed. A Lindner), pp. 221–226. Wageningen Academic Publishers, Paris, France.

Gottlieb-Vedi M, Essen-Gustavsonn B and Persson S 1991. Draught load and speed compared by submaximal tests on a treadmill. In Proceeding 3rd International Conference on Equine Exercise Physiology (ed. S Persson, A Lindholm and L Jeffcott), pp. 92–96. ICEEP Publications, Davis, USA.

Gottlieb-Vedi M, Persson S, Erickson H and Korbutiak E 1995. Cardiovascular, respiratory and metabolic effects of interval training at VLA4. Zentralbl Veterinarmed 42, 165–175.

INRA-HN-IE 1997. Notation de l'état corporel des chevaux de selle et de sport. Guide pratique. Institut de l'Elevage, Paris, France.

Langsetmo I and Poole D 1999. VO_2 recovery kinetics in the horse following moderate, heavy, and severe exercise. Journal of Applied Physiology 86, 1170–1177.

Lawrence L 2009. Assessing energy balance. In Advances in equine nutrition IV (ed. JD Pagan), pp. 43–50. Nottingham University Press, Nottingham, UK.

Martin-Rosset W 2012. Nutrition et alimentation des chevaux. Editions Quae, Versailles, France.

McCutcheon L, Geor R and Hinchcliff K 1999. Effects of prior exercise on muscle metabolism during sprint exercise in horses. Journal of Applied Physiology 87, 1914–1922.

Meixner R, Hörnicke H and Ehrlein H 1981. Oxygen consumption, pulmonary ventilation and heart rate of riding horse during walk, trot and gallop. Biotelemetry 6, 125–128.

Mello F, Bertuzzi R, Grangeiron P and Franchini E 2009. Energy systems contributions in 2000 m race simulation: a comparison among rowing ergometers and water. European Journal of Applied Physiology 107, 615–619.

National Research Council (NRC) 2007. Nutrient requirements of horses. National Academy Press, Washington, DC, USA.

Pagan J and Hintz H 1986. Equine energetics II. Energy expenditure in horses during submaximal exercise. Journal of Animal Science 63, 822–830.

Pösö A, Essen-Gustavsson B and Persson S 1993. Metabolic responses to standardised exercise test in Standardbred trotters with red cell hypervolaemia. Equine Veterinary Journal 25, 527–531.

Pösö A, Lampinen K and Räsänen L 1995. Distribution of lactate between red blood cells and plasma after exercise. Equine Veterinary Journal. Supplement 18, 231–234.

Sommaire L 2007. Pratiques alimentaires et entrainement du cheval de course de 3 ans: enquete dans 60 écuries en France. Etude des apports azotés et énergétiques. Thesis Veterinary, Ecole National Vétérinaire d'Alfort, Maisons-Alfort, France.

Tyler C, Hodgson D and Rose R 1996. Effect of a warm-up on energy supply during high intensity exercise in horses. Equine Veterinary Journal 28, 117–120.

van Erck EV, Votion DM, Serteyn D and Art T 2007. Evaluation of oxygen consumption during field exercise tests in Standardbred trotters. Equine and Comparative Exercise Physiology 4, 43–49.

Viru A and Viru M 2000. Nature of training effects. In Exercise and sport science (ed. W Garrett and D Kirkendall), pp. 67–95. Lippincott Williams and Wilkins, Philadelphia, PA, USA.

Wegener J, Lindner A and Hartmann U 2012. Survey on the training of Standardbred racehorses by a successfull trainer. Pferdeheilkunde 28, 268–280.

Wilmore J, Costill D and Kenney W 2009. Physiologie du sport et de l'exercice, 4th edition. De Boeck, Bruxelles, Belgium.

Supplementary File - for Online Publication Only

Supplementary Figure S1 A Standardbred trotter exercising a parcours with the Equimask connected to the portable gas analyser K4b² with his battery fixed on the sulky.

3.1.2 La comparaison de méthodes d'estimation de la dépense énergétique au cours des exercices d'entraînement

Ce travail a été valorisé sous la forme d'une publication courte soumise et acceptée avec majeures révisions à Journal of Animal Science le 12 septembre 2014. Les données de chaque cheval obtenues au cours de cette étude sont présentées en Annexe 8.

Publication courte 4

Technical note: Comparison of two methods to quantify exercise energy expenditure in Standardbred trotters

J Fortier, G Deley and V Julliand

Journal of Animal Science, article accepté avec majeures révisions le 12 septembre 2014.

1 **Running head:** Energy expenditure in exercising trotters

2

3 # Technical note: Comparison of two methods to quantify exercise energy

4 # expenditure in trotters

5

6 **J. Fortier[1]*, G. Deley[2] and V. Julliand[1]**

7

8 [1]URANIE – USC Nutrition du Cheval Athlète, AgroSupDijon, 26 bd Dr. Petitjean, BP87999,

9 21079 Dijon cedex, France

10 [2]Centre d'Expertise de la Performance, Dijon, France

11

12 *Corresponding author:

13 Justine Fortier

14 AgroSup Dijon, Pôle Agricole, Route d'Arnay le Duc

15 21 320 Créancey, France

16 justine.fortier@gmail.com

17
18
19
20

ABSTRACT: This study aimed at quantifying energy expenditure during four specific training exercises i.e. promenade, jogging, parcours and interval exercises using field measurements of oxygen consumption and heart rate in trotters. Six animals performed two preliminary tests to determine their individual maximum velocity and to establish their individual oxygen consumption/heart rate relationship from an incremental test. Then, they undertook each of the four specific exercises separated by one week to avoid fatigue. The intensity of the four exercises was expressed in % of individual maximum velocity as well as the duration and distance were set according to current training practices of French trotter trainers. Throughout the incremental test and the four exercises, oxygen consumption and heart rate were continuously recorded using a portable respiratory gas analyzer. Energy expenditure of the three different phases (warm-up, exercise and recovery) of the four exercises and the total energy expended during exercises (addition of energy expended during the three phases) were calculated from direct oxygen uptake measurements and from estimated oxygen uptake using heart rate and O_2 caloric equivalent. The quantification of total energy expenditure from the two methods was not significantly different. However, estimated energy expenditure was significantly lower from estimated oxygen consumption than direct oxygen uptake method concerning the warm-up and exercise phase of parcours.

Our results indicate that the estimated oxygen uptake from heart rate measurements could be used to evaluate total energy expenditure of exercises in trotters. While this method requires previous establishment of an individual oxygen consumption/heart rate curve, it is easy to record using commercially available instruments under practical conditions and opens new perspectives to assess energy balance in trotters' nutrition.

Key words: cardiorespiratory responses, energy expenditure, training exercises, trotter horses,

INTRODUCTION

Training represents one of the most challenging periods for energy balance in equine athletes who perform repetitive exercises inducing an increased physiological and energetic demands (NRC, 2007). In trotters, training is composed of specific exercises (Wegener et al., 2012; Fortier et al., 2014) that have been recently characterized (type, intensity, duration;Fortier et al., 2014).

In humans, the energy expenditure during exercise is generally estimated from oxygen consumption measurement and the caloric equivalent of oxygen (Levine, 2005) since respiratory gas measurements are largely used (Bertuzzi et al., 2007). Although these measurements are also used in exercising horses (Pagan and Hintz, 1986), their evaluations under field conditions remain scarce due to late scientific validation of portable gas analyzers (Art et al., 2006). Therefore, methodologies that can be more easily implemented in the field seem required to estimate the energy expended during exercise.

Moreover, in humans heart rate is often used as an indirect method to estimate energy during work outs under real-life conditions (Crouter et al., 2004; Erdogan et al., 2010) based on the relationship between heart rate and energy expenditure (Levine, 2005). Although the oxygen consumption/heart rate method was reported to give a close estimate of energy expended (Spurr et al., 1988), only individual oxygen consumption/heart rate curves should be used to obtain the best estimates of individual energy expenditure (Li et al., 1993). In horses, a prediction model of oxygen consumption/heart rate relationship was developed from literature data with horses exercising under various conditions (Coenen et al., 2011). Nevertheless, individual oxygen consumption/heart rate curves have never been investigated to estimate energy expenditure during specific exercises and were never compared to field direct oxygen measurements in trotters. This study aimed to quantify and compare energy

70 expenditure during four specific training exercises using field measurements of oxygen
71 consumption and of heart rate in Standardbred trotters.
72
73 **MATERIALS AND METHODS**
74 The project was conducted under the ethics committee of animal experimentation
75 (Grand Campus Dijon France) approval 0313.
76 Six healthy driven trotters geldings participated in this study (mean age: 7.8 ± 1.9
77 years; mean bodyweight: 478 ± 25 kg; mean body condition score, on a scale of 0 to 5
78 (INRA-HN-IE, 1997; 3.0 ± 0.0). They were trained four times per week, 2 hours walk on a
79 treadmill (Horse-Gym 2000 GmbH, Harburg-Großsorheim, Germany) and a 2 hours trot on
80 an 1,150 m sandy track. All were driven by the same person throughout the experiment.
81 Trotters performed once a maximum velocity test and an incremental test. Each horse
82 maximum velocity was determined by trotting over a distance of 500 m, in order to adapt the
83 intensity of its exercises as a percentage of its maximal velocity. After one week, trotters
84 carried out the field incremental test to establish their individual oxygen consumption/heart
85 rate relationship. Increment test started at 4.2 m/s with speed increments of 1.4 m/s every 3
86 minutes until exhaustion. It ended when the horses could no longer sustain the imposed speed
87 despite the driver's verbal encouragements or when they committed a fault i.e. they ran in gait
88 other than trot. Then, all trotters performed in the following order parcours, interval, jogging
89 and promenade exercises (Fortier et al., 2014). Exercises were separated by one week in order
90 to avoid fatigue. The intensity of the four testing situations was expressed in % of maximal
91 velocity, as well as duration and distance were set according to current training practices of
92 French Standardbred trainers (Fortier et al., 2014) (Table 1).
93 Throughout the incremental test and the four specific exercises, oxygen uptake was
94 measured breath-by-breath with the portable gas analyzer (K4b², COSMED, Rome, Italy)

95 calibrated using a 2-point calibration before each test as described in Fortier et al. (in press).
96 Heart rate was recorded continuously using the Polar system (Polar, Polar Electro OY,
97 Kempele, Finland) incorporated to the K4b² system during each test. The values of heart rate
98 and oxygen consumption (L/min) recorded during the last minute of each step of the
99 incremental test (Spurr et al., 1988) were used to established the oxygen consumption/heart
100 rate relationship. A polynomial regression model using routine statistical procedures was
101 utilized to analyze the individual relationship. To calculate energy expenditure from direct
102 oxygen consumption, oxygen uptake at rest, i.e. the mean of the last 30 s of the rest period
103 prior the beginning of the four specific exercises with horses not moving, was subtracted from
104 the total oxygen consumption recorded during the different phases of each exercise i.e. warm-
105 up, exercise and recovery. To calculate energy expenditure related to exercise from heart rate
106 measurements, oxygen uptake at rest was estimated using the individual oxygen
107 consumption/heart rate regression and was subtracted from the estimated oxygen uptake
108 during warm-up, exercise and recovery phases, which was also estimated using the individual
109 oxygen consumption/heart rate regression. A caloric equivalent of 20.9 kJ/Lfor oxygen was
110 used to convert direct and estimated oxygen consumption into energy (Bertuzzi et al., 2007).
111 Energy expenditure of the different phases (warm-up, exercise and recovery) and total energy
112 expended during exercise (i.e. = warm-up + exercise + recovery) expressed in kJ/min/kg,
113 were calculated for each exercise.
114 Data are presented as mean ± standard deviation (SD). Statistical analysis was carried
115 out using an ANOVA test to compare the energy expenditure obtained with direct and with
116 estimated oxygen consumption, for each phase of the specific exercises. . The effect of the
117 calculation method and horse were tested. Pearson's correlation coefficient was calculated to
118 determine associations between oxygen consumption and heart rate. Differences were
119 considered statistically significant at $P < 0.05$.

120

121 **RESULTS AND DISCUSSION**

122 Our study is the first to compare energy expenditure quantified during specific field
123 training exercises in trotters using either direct oxygen consumption measurements or
124 estimated oxygen consumption from heart rate measurements and the individual oxygen
125 consumption/heart rate relationship. The oxygen consumption and heart rate responses
126 measured during the four exercises and their different phases are presented in Table 2.

127 The quantification of the total energy expenditure was not different whatever the
128 method and the exercise (promenade: 0.49 ± 0.11 vs. 0.56 ± 0.32 kJ/min/kg; jogging: 0.78 ±
129 0.12 vs. 0.56 ± 0.27 kJ/min/kg; parcours: 0.76 ± 0.17 vs. 0.66 ± 0.26 kJ/min/kg; interval: 0.79
130 ± 0.15 vs. 0.74 ± 0.20 kJ/min/kg; for direct oxygen consumption method and estimated
131 oxygen consumption method respectively.

132 However, more in-depth data analysis indicated that, for the parcours exercise, the
133 energy expended during warm-up and exercise phases from estimated oxygen consumption
134 method was significantly lower than that obtained from direct oxygen consumption method
135 (warm-up: 1.04 ± 0.20 vs. 0.82 ± 0.23 kJ/min/kg; $P = 0.049$ and exercise: 1.79 ± 0.43 vs. 1.39
136 ± 0.54 kJ/min/kg; $P = 0.037$ for direct oxygen consumption and estimated oxygen
137 consumption methods respectively).

138 For the four exercises the percentage of error between the energy quantification from
139 direct and estimated oxygen measurements varied from to -30 to +15%. . In human literature,
140 the percentages of error with the estimated oxygen consumption method usually ranged from -
141 17 to +20% (Spurr et al., 1988; Livingstone et al., 1990; Bitar et al., 1996). Our results
142 suggest that the use of the heart rate and the oxygen consumption/heart rate relationship tend
143 to underestimate more the energy expenditure of exercises in equines than in humans.

144 The evaluation of energy from estimated oxygen consumption method gave a
145 Pearson's correlation coefficient of the oxygen consumption/heart rate relationships at 0.79 ±
146 0.09. In most studies in humans, this correlation coefficient has been taken as evidence of the
147 reliability of the estimates. This correlation coefficient has been reported from 0.80 to 0.99
148 (Christensen et al., 1983), which is in accordance with those reported in our study in horses.
149 Our estimation of energy expenditure from oxygen consumption/heart rate relationship
150 relied on the polynomial regression model which gave a higher coefficient correlation than the
151 linear model (data not shown). In the literature, previous studies investigated the nature of the
152 mathematical model and were controversial. Crouter et al. (2004) reported that linear models
153 were particularly adapted for dynamic activities involving large muscle groups. Moreover, the
154 linear model has been reported not to be suitable for low and high intensities activities both in
155 humans (Levine, 2005) and equines (Matsui et al., 2004). Others types of mathematical
156 models have been explored in the literature and it seemed that the polynomial regression
157 model gave better estimations of EE (Bitar et al., 1996), which is confirmed in our study.
158 These heterogeneous results concerning the nature of the regression could be explained by the
159 influence of several factors on heart rate. In fact, emotional stress and ambient factors
160 (temperature, humidity, altitude; Butler et al., 2004) as well as individual characteristics such
161 as fitness level, age and gender could influence the cardiac responses (Kamalakannan et al.,
162 2007). In fact, as indicated by significant individual effects in our results, the precision of
163 heart rate prediction of EE is improved where a separate regression equation is derived to
164 relate heart rate and oxygen consumption for each individual (Levine, 2005). This statement
165 explained the development of EE models including individual characteristics in humans
166 (Kamalakannan et al., 2007).
167 Our results suggest that the estimation of oxygen consumption from heart rate could
168 be used, despite a risk of underestimation in certain conditions, to evaluate total energy

expenditure of specific exercises in trotters. This method could be particularly interesting when direct oxygen consumption measurements are not possible. Nevertheless, the estimation of oxygen uptake from heart rate requires the use of a previously established individual oxygen consumption/heart rate curve to estimate energy expenditure during exercises. While this method offers an inexpensive way to assess energy balance in the nutrition of Standardbred trotters, our data required further investigation to test the duration of validity of this curve, which should probably evolved with a regular training. Moreover, these first results concerning the establishment of oxygen consumption/heart rate relationship should be used as a starting point to define an oxygen consumption/heart rate relationship model taking into account individual parameters in horses, such as age, gender and/or body weight.

182 **LITERATURE CITED**

183 Art, T., D. H. Duvivier, E. Van Erck, B. de Moffarts, D. Votion, D. Bedoret, J. P. Lejeune, P.
184 Lekeux, and D. Serteyn. 2006. Validation of a portable equine metabolic measurement
185 system. Equine Vet. J. Suppl. 36:557-561.
186 Bertuzzi, R., E. Franchini, E. Kokubun, and M. Kiss. 2007. Energy system contributions in
187 indoor rock climbing. Eur. J. Appl. Physiol. 101: 293-300.
188 Bitar, A., M. Vermorel, N. Fellmann, M. Bedu, A. Chamoux, and J. Coudert. 1996. Heart rate
189 recording method validated by whole-body indirect calorimetry in 10-yr-old children.
190 J. Appl. Physiol. 81:1169-1173.
191 Butler, P., J. Green, I. Boyd, and J. Speakman. 2004. Measuring metabolic rate in the field:
192 The pros and cons of the doubly labelled water and heart rate methods. Funct. Ecol.
193 18:168-183.
194 Christensen, C., H. Frey, E. Foenstelien, E. Aadland, and H. Refsum. 1983. A critical
195 evaluation of energy expenditure estimates based on individual O2 consumption/ heart
196 rate curves and average daily heart rate. Am. J. Clin. Nutr. 37:468-472.
197 Coenen, M., E. Kienzle, I. Vervuert, and A. Zeyner. 2011. Recent German Developments in
198 the formulation of energy and nutrient requirements in horses and the resulting feeding
199 recommendations. J. Equine Vet. Sci. 31:219-229.
200 Crouter, S., C. Albright, and J. Bassett. 2004. Accuracy of Polar S410 heart rate monitor to
201 estimate energy cost of exercise. Med. Sci. Sport Exer. 36:1433-1439.
202 Erdogan, A., C. Cetin, H. Karatosun, and M. Lütfi Baydar. 2010. Accuracy of the Polar
203 S810iTM heart rate monitor and the Sensewear Pro ArmbandTM to estimate energy
204 expenditure of indoor rowing exercise in overweight and obese individuals. J. Sports
205 Sci. Med. 9:508-516.
206 Fortier, J., D. Deley, A. G. Goachet, V. Julliand. Quantification of the energy expenditure
207 during training exercises in Standardbred trotters. Animal. In Press.
208 Fortier, J., V. Julliand, P. Harris, A. G. Goachet. 2014. Training management of Standardbred
209 trotters: A field survey in France. Comp. Exerc. Physiol. 10:63-71.
210 INRA-HN-IE. 1997. Notation de l'état corporel des chevaux de selle et de sport. Guide
211 pratique. Institut de l'Elevage, Paris, France.
212 Kamalakannan, B., W. Groves, and A. Freivalds. 2007. Predictive models for estimating
213 metabolic workload based on heart rate and physical characteristics. JSHER. 4:1-26.
214 Levine, J. 2005. Measurement of energy expenditure. Public Health Nutr. 8:1123-1132.
215 Li, R., P. Deurenberg, and J. Hautvast. 1993. A critical evaluation of heart rate monitoring to
216 assess energy expenditure in individuals. Am. J. Clin. Nutr. 58:602-607.
217 Livingstone, M. B., A. M. Prentice, W. A. Coward, S. M. Ceesay, J. J. Strain, P. G. McKenna,
218 G. B. Nevin, M. E. Barker, and R. J. Hickey. 1990. Simultaneous measurements of
219 free-living energy expenditure by the doubly labeled water method and heart-rate
220 monitoring. Am. J. Clin. Nutr. 52:59-65.
221 Matsui, A., R. Katsuki, H. Fujikawa, M. Kai, K. Kubo, A. Hiraga, and Y. Asai. 2004. Effects
222 of uphill exercise on digestible energy intake and energy expenditure during exercise
223 in yearling horses. Asian-Aust. J. Anim. Sci. 17:973-979.
224 NRC. 2007. Nutrient requirements of horses. 6th rev. ed. Natl. Acad. Press, Washington, DC.
225 Pagan, J., and H. Hintz. 1986. Equine energetics II. Energy expenditure in horses during
226 submaximal exercise. J. Anim. Sci. 63:822-830.
227 Spurr, G., A. Prentice, and P. Murgatroyd. 1988. Energy expenditure from minute-by-minute
228 heart rate recording: Comparison with indirect calorimetry. Am. J. Clin. Nutr. 48:552-
229 559.
230 Wegener, J., A. Lindner, and U. Hartmann. 2012. Survey on the training of Standardbred
231 racehorses by a successfull trainer. Pferdeheilkunde. 28:268-280.

232 **Table 1.** Characteristics of the promenade, jogging, parcours and interval exercises and their
233 different phases (warm-up, exercise and recovery).
234

	Promenade	Jogging	Parcours	Interval
Warm-up				
% of v500			48	48
Duration, s			720	720
Distance, m			4,060	4,060
Exercise				
% of v500	37	51	74	79/20
Duration, s	3,180	1,800	340	96/118
Distance, m	13,700	10,600	2,970	907/150
Run	1	1	1	5
Recovery				
% of v500			38	38
Duration, s			550	550
Distance, m			2,250	2,250

235 The intensity (expressed as % of the maximal velocity over 500 meters i.e. v500), the duration
236 in second (s) and the distance in meter (m) are specified for each exercise, as the number of
237 bout for the exercise phase. The parcours and interval included a warm-up and a recovery
238 phase, whereas the promenade and jogging only included an exercise phase. The promenade,
239 jogging and parcours are continuous exercises consisted in one repetition of the exercise
240 phase, whereas the exercise phase of interval consisted in the repetition of five 907 m high
241 intensity runs (79% of v500) interspersed with 1 min 58 low intensity phases (20% of v500).
242

243 **Table 2.** Physiological responses of Standardbred trotters during the four specific exercises
244 used in trotters training.
245

	Promenade	**Jogging**	**Parcours**	**Interval**
$HR_{wu,}$ beat/min	-	-	156 ± 12	161 ± 13
$HR_{ex,}$ beat/min	134 ± 17	149 ± 19	188 ± 12	169 ± 12
$HR_{rec,}$ beat/min	-	-	140 ± 5	138 ± 10
$VO_{2wu,}$ ml/min/kg	-	-	49.4 ± 9.1	55.9 ± 7.7
$VO_{2ex,}$ ml/min/kg	30.9 ± 4.3	49.9 ± 4.8	89.6 ± 21.6	64.7 ± 12.1
$VO_{2rec,}$ml/min/kg	-	-	33.0 ± 10.1	38.6 ± 6.2

246

247 Data are reported as means and standard deviation (SD) (n = 6). Heart rate during warm-up
248 (HR_{wu}), exercise (HR_{ex}) and recovery (HR_{rec}) during promenade, jogging, parcours and
249 interval; Oxygen uptake during warm-up (VO_{2wu}), exercise (VO_{2ex}), and recovery (VO_{2rec})
250 during promenade, jogging, parcours and interval.
251
252
253

DISCUSSION GENERALE

L'objectif de ce travail de thèse était de quantifier la dépense énergétique liée aux exercices chez le cheval trotteur attelé par des mesures de consommation d'oxygène et de fréquence cardiaque en conditions de terrain. La mesure des réponses cardiorespiratoires à l'exercice aigu, via un appareil portable, est une technique peu utilisée en conditions réelles d'exercice chez les chevaux bien qu'elle soit la plus adaptée. Nos données cardiorespiratoires ont permis de compléter les connaissances sur le fonctionnement physiologique et d'approcher la dépense énergétique induite par les exercices d'entraînement chez le cheval trotteur attelé. Cette discussion générale sera focalisée sur les contributions techniques et scientifiques les plus originales de nos travaux. Bien que ceci ne relève pas du domaine scientifique, nous commencerons par les mises au point méthodologiques qui ont été nécessaires pour répondre à notre objectif et qui pourront être utilisées et appliquées à de futures recherches sur l'étude de la physiologie à l'exercice du cheval trotteur. Nous discuterons ensuite la quantification énergétique liée aux différents exercices d'entraînement pour enfin proposer une estimation de la dépense énergétique totale chez le cheval trotteur à l'entraînement.

1. Les apports méthodologiques préalables

Nous avons mesuré la consommation d'oxygène et la fréquence cardiaque sur un lot de chevaux trotteurs maintenus en conditions contrôlées. Comme nous l'avons précisé dans le cadre théorique, le K4b² équin est actuellement l'outil de mesure le plus avancé permettant de réaliser ces mesures chez le cheval en conditions réelles d'exercice. Cet appareil a été acquis par l'équipe de recherche URANIE afin d'initier des mesures de dépense énergétique en conditions de terrain sur une population de chevaux d'endurance. Ces premiers travaux ont nécessité des ajustements liés aux contraintes de l'exercice pour la discipline de l'endurance (communication personnelle). Ainsi, pour la discipline du trot, nous avons mené un essai préliminaire sur les chevaux trotteurs maintenus en conditions contrôlées afin de déterminer les ajustements techniques nécessaires au bon déroulement des futurs essais. Ce travail a fait l'objet de mon stage de Master en Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives spécialité « Entraînement et Management du Sport » et a été valorisé sous forme d'une communication orale à l'Equine NUtrition and TRAining COnference (ENUTRACO) en 2011 à Paris.

Contrairement au problème qui avait été soulevé pour les chevaux d'endurance, la taille du masque était parfaitement adaptée à la morphologie du cheval trotteur, permettant de conserver le mors sous le masque et d'assurer le contrôle des chevaux par le driver. En revanche, un ensemble de consolidations a été nécessaire pour adapter l'utilisation de l'appareil à la pratique du trot attelé. La fixation du masque sur la tête des chevaux a été renforcée pour éviter qu'il ne bouge mais également pour assurer une étanchéité optimale. Bien que le constructeur nous ait assuré que les déperditions d'air étaient quasi nulles chez le cheval, puisque ce dernier ne peut respirer que par les voies nasales (Denoix,

1989), nous avons préféré sécuriser l'ensemble des mesures par la pose d'un plastique ajusté autour du masque et de la bouche du cheval. De plus, comme l'avaient précisé Van Erck *et al.* (2007), l'utilisation d'un enrênement spécifique « headcheck » a été nécessaire. Le « headcheck » est couramment utilisé dans l'entraînement des chevaux trotteurs et a pour vocation de limiter les mouvements de tête des chevaux. Il a été particulièrement utile pour éviter aux chevaux de baisser la tête et de heurter les turbines au sol. En effet, lors de l'essai préliminaire, nous avons été confrontés à un incident de ce type, interrompant les travaux jusqu'au retour du matériel par le service réparation d'Italie. Nous avons également montré que chez le cheval trotteur attelé, il était préférable de fixer l'analyseur et sa batterie au brancard du sulky, plutôt que de le fixer sur un collier de chasse au niveau de l'épaule du cheval. Ceci occasionne moins de gêne pour le cheval et permet une sécurisation optimale de l'enregistreur. L'équipement total du cheval et la fixation du matériel au sulky nécessitait environ 40 min par cheval et au minimum trois personnes dont le driver. En plus du temps d'équipement des chevaux, la calibration avant chaque test était également consommatrice de temps. Nous avons ainsi limité à deux le nombre d'essais par jour.

L'utilisation du K4b² équin et de l'Equimask requière une adaptation rigoureuse et relativement longue qui est actuellement peu transposable en conditions de terrain non expérimentales.

Afin de quantifier la dépense énergétique liée aux exercices d'entraînement (précédemment identifiés sur des chevaux trotteurs de course) sur nos chevaux trotteurs, nous avons dû choisir un paramètre permettant d'adapter les exercices à leurs capacités individuelles. Cette adaptation permet de s'assurer que chaque cheval reçoive la même charge de travail, optimisant ainsi les effets de l'exercice.

Compte tenu des conclusions précédentes sur l'utilisation du K4b² équin et de l'Equimask en conditions non expérimentales, nous avons exclu toute utilisation de l'appareil sur les chevaux de Grosbois et donc exclu toute mesure respiratoire. Bien que chez l'athlète humain, la mesure de VO_{2max} fasse office de paramètre de référence pour évaluer les capacités d'un athlète (Saltin et Astrand, 1967 ; Gaskill *et al.*, 2001) et pour exprimer l'intensité d'effort, la mesure de la vitesse moyenne et maximale sur une distance donnée est également utilisée (Nummela *et al.*, 2007 ; Brughelli *et al.*, 2011). Chez le cheval, cette vitesse a également été utilisée pour caractériser l'intensité d'effort chez des chevaux de selle (Hanak *et al.*, 2001). Ainsi, la v500, mesurée à 14,2 m/s (51,1 k/m) et 11,7 m/s (42,1 km/h) pour les chevaux de Grosbois et nos chevaux trotteurs respectivement, est une mesure facile à réaliser autant en conditions contrôlées que non contrôlées. C'est d'ailleurs une mesure connue des entraîneurs de trot qui l'utilisent comme « valeur de référence » pour chaque cheval. La connaissance et l'utilisation de la v500 par les entraîneurs de trot a probablement augmenté nos chances d'avoir des entraîneurs participants à l'essai 1b. Nous avons néanmoins été confrontés au fait que les entraîneurs ne souhaitaient pas perturber leur programme d'entraînement, ce qui a limité le nombre de chevaux investigués.

L'utilisation de la mesure de v500 pour caractériser l'intensité d'effort est un des seuls paramètres pratiques et facilement mesurables en toutes conditions chez le cheval trotteur. La v500 permet ainsi d'adapter la charge de travail aux capacités de chaque trotteur.

Comme expliqué dans la problématique de thèse, la mise en place d'un test incrémental adapté à la discipline du trot attelé a été une étape indispensable pour établir une relation entre la consommation d'oxygène et la fréquence cardiaque. En effet, l'étude de la littérature a souligné un manque de tests incrémentaux continus spécifiques à la discipline du trot qui soient validés et qui permettent d'investiguer les réponses cardiorespiratoires et la relation VO_2/FC. Nous avons alors proposé deux tests incrémentaux de type continu et strictement réalisés au trot afin de se rapprocher du spécifique de la discipline (Bompa et Haff, 2009). La conception d'un test incrémental nécessite des choix précis pour définir le protocole adéquat. Les paramètres tels que la vitesse initiale, les incréments de vitesse et la durée des paliers sont en effet bien connus pour influencer les réponses cardiorespiratoires chez l'homme (Buchfuhrer *et al.*, 1983 ; Bishop *et al.*, 1998). D'après l'étude comparée des réponses cardiorespiratoires entre l'homme et le cheval, nous avons fait varier ces trois paramètres en les adaptant aux chevaux trotteurs. Par exemple, les vitesses initiales de 4,2 et 6,4 m/s pour T1 et T2 respectivement sont des vitesses couramment pratiquées par les entraîneurs de trot pour réaliser un exercice de faible intensité ou un échauffement. Ainsi en débutant à ces faibles intensités, les tests d'effort ont été réalisés sans échauffement.

En dépit de l'impossibilité des trotteurs à poursuivre leur effort en fin de tests, les données de consommation d'oxygène et de fréquence cardiaque atteintes lors du dernier palier n'ont pas indiqué d'état stable malgré une augmentation de la vitesse. Nous avons ainsi privilégié l'utilisation des termes de VO_{2pic} et FC_{pic}. Ces résultats peuvent être partiellement expliqués par la locomotion des chevaux trotteurs. En effet, la discipline du trot repose sur un principe fondamental selon lequel les chevaux doivent se déplacer exclusivement au trot, pouvant représenter une contrainte mécanique. L'hypothèse d'une contrainte locomotrice limitant l'exploration maximale du système cardiorespiratoire du cheval trotteur pourrait alors être avancée, mais nécessite d'être vérifiée. La seule possibilité serait de soumettre des chevaux trotteurs à un test incrémental jusqu'à épuisement au galop. En pratique cette vérification semble peu réalisable puisque les chevaux trotteurs reçoivent dès leur plus jeune âge un apprentissage sanctionnant tout passage au galop. Au regard de ce qui est connu chez l'homme dans la discipline de la marche athlétique, certains auteurs ont proposé des tests spécifiques à la discipline entièrement réalisés en marchant (Drake *et al.*, 2011). Des études se sont également intéressées à la possibilité d'atteindre VO_{2max} chez des marcheurs athlétiques, en comparant deux tests incrémentaux réalisés en marchant et en courant. Les résultats ont indiqué des valeurs de VO_{2max} similaires chez des coureurs athlétiques de haut niveau autant en marchant qu'en courant (Menier et Pugh, 1968 ; Hagberg et Coyle, 1984). Cependant, la vitesse maximale à VO_{2max} (pour les meilleurs sujets à 14,5-16,0 km/h)

était limitée par la marche contrairement à la course. Le niveau élite des sujets participant à cette étude pourrait expliquer les réponses de VO_{2max} similaires en marchant et en courant. Ces résultats ne permettent pas d'extrapoler sur l'atteinte de VO_{2max} et FC_{max} en marchant chez des sujets de niveau inférieur. Nous pourrions ainsi étendre ces observations à nos chevaux trotteurs ayant un niveau de condition physique inférieur aux chevaux élites de Grosbois, bien que cela nécessite d'être vérifié.

Au cours des tests T1, débutant à 4,2 m/s avec des incréments de vitesse de 1,4 m/s toutes les 3 min, et T2, débutant à 6,4 m/s avec des incréments de vitesse de 0,8 m/s toutes les 2 min, nos résultats ont indiqué une sollicitation cardiorespiratoire plus importante (VO_{2pic} : 116,6 ± 11,5 *vs.* 88,9 ± 10,2 ml/min/kg, $P < 0,05$; FC_{pic} : 217 ± 5 bpm *vs.* 209 ± 3 bpm; $P < 0,05$) avec T1 par rapport à T2 respectivement. De plus, le coefficient de corrélation entre la consommation d'oxygène et la fréquence cardiaque tendait à être plus élevé avec T1 comparé à T2 ($r = 0,93 \pm 0,03$ *vs.* $r = 0,88 \pm 0,06$; $P = 0,06$ respectivement). Cette contribution méthodologique permet de compléter les données en physiologie équine en apportant de nouvelles données cardiorespiratoires de chevaux trotteurs soumis à des tests incrémentaux continus en conditions de terrain. De manière plus originale, la mise au point du test incrémental permet d'établir la courbe de régression entre la consommation d'oxygène et la fréquence cardiaque et ainsi d'estimer VO_2 de manière indirecte. Compte tenu des conclusions précédentes sur la complexité de la mesure des échanges respiratoires en conditions de terrain et la fragilité du matériel validé, cet apport méthodologique permet en outre de pallier ces difficultés et d'estimer la VO_2 à partir de la FC. Néanmoins, de nouveaux essais semblent nécessaires pour valider les tests incrémentaux.

L'utilisation du test d'effort incrémental continu semble adaptée la discipline du trot attelé et est facilement applicable sur le terrain.

2. L'estimation de la dépense énergétique liée aux exercices d'entraînement

Nous avons quantifié la dépense énergétique à partir de mesures cardiorespiratoires à l'effort puisque l'augmentation de la dépense énergétique occasionnée par l'exercice s'accompagne d'une intensification du fonctionnement des appareils respiratoire et cardiaque (Vermorel *et al.*, 1984 ; Levine, 2005 ; Bertuzzi *et al.*, 2007). Les mesures cardiorespiratoires réalisées avec le K4b² ont démontré quelques biais lors de précédentes études (Art *et al.*, 2006 ; Votion *et al.*, 2006 ; Van Erck *et al.*, 2007). En effet, la fraction de CO_2, la mesure du VCO_2 et la ventilation ont démontré des réponses non conformes aux données physiologiques lors d'exercices à intensité élevée soit vers 10 m/s (36 km/h). Nos résultats n'ont pas présenté de sous-estimation dans la fraction de CO_2., puisque nos mesures de VCO_2 sont en accord avec les données de la littérature, même au-delà de 10 m/s (Figure 13). Néanmoins, l'hypothèse d'une sous-estimation de la ventilation, induite par de faibles valeurs de fréquence respiratoire, pourrait être suspectée si l'on compare nos données avec celles obtenues chez les chevaux trotteurs (Gauvreau *et al.*, 1995 ; Van Erck *et al.*, 2007) et chez les chevaux toutes races et conditions confondues (Figure 13). Cette hypothèse a été confirmée par la firme Cosmed en précisant que la ventilation du cheval à l'effort intense était telle qu'elle dépassait forcement les capacités de l'appareil. Les turbines pourraient présenter une certaine résistance qui perturberait la ventilation lorsque les débits augmentent à l'effort. Bien que cette hypothèse ait été soulevée dans de précédentes études (Art *et al.*, 2006), elle n'a, à notre connaissance, jamais été vérifiée. Concernant les mesures de consommation d'oxygène avec le K4b² équin, les premiers travaux utilisant l'appareil ont confirmé la cohérence de la mesure de VO_2 en conditions de terrain (Art *et al.*, 2006). Nos résultats, en accord avec les données de VO_2 obtenues chez les chevaux trotteurs en conditions de terrain (Gauvreau *et al.*, 1995 ; Van Erck *et al.*, 2007) et chez les chevaux toutes races et conditions confondues (Figure 13), confirment ces précédentes conclusions.

De futures modifications du K4b² équin semblent nécessaires pour adapter le système aux mécanismes ventilatoires de chevaux, en particulier à des fréquences respiratoires élevées. Néanmoins, nos mesures de VO_2 et VCO_2 sont en accord avec les données physiologiques connues chez les chevaux à différentes vitesses, même à des intensités d'exercice élevées vers 12 m/s (43,2 km/h).

Ces résultats confirment la pertinence de la mesure de consommation d'oxygène avec le K4b² équin et l'Equimask, permettant ainsi d'estimer la dépense énergétique liée aux exercices chez nos chevaux trotteurs maintenus en conditions contrôlées.

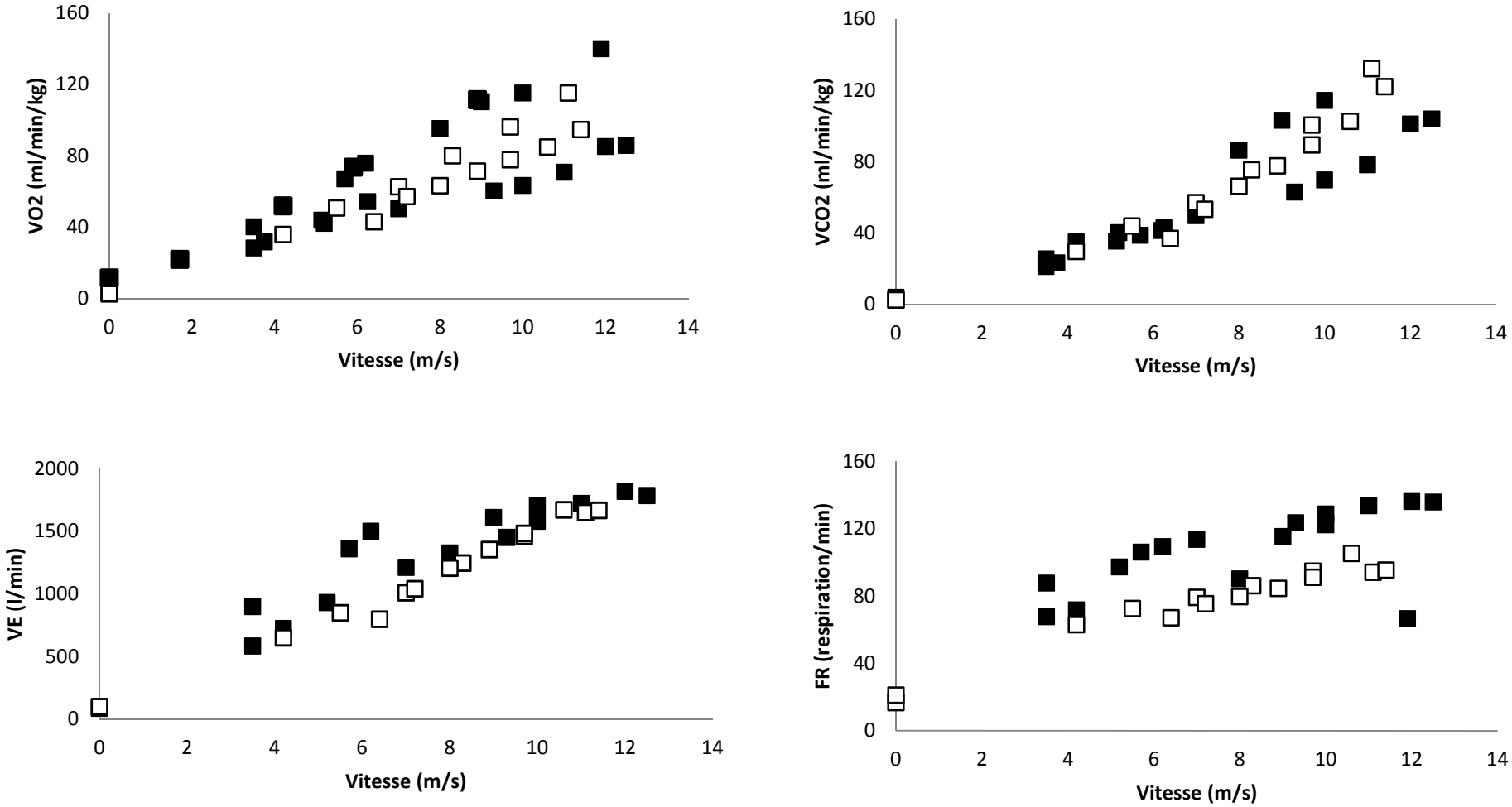

Figure 13. Comparaison des données physiologiques de consommation d'oxygène (VO_2, ml/min/kg), de dioxyde de carbone rejeté (VCO_2, ml/min/kg), de ventilation (V_E, l/min) et de fréquence respiratoire (Fr, respiration/min) en fonction de la vitesse d'exercice (m/s) obtenues lors de l'essai 2 (publication 2) sur les cinq chevaux trotteurs maintenus en condition expérimentale contrôlée (□) avec les données de la littérature toutes races et conditions confondues (■) (Art *et al.*, 2006 ; Votion *et al.*, 2006 ; Van Erck *et al.*, 2007 ; Coenen, 2008 ; Coenen, 2010 ; Cottin *et al.*, 2010 ; Lauriers, 2010).

Nos travaux de quantification énergétique chez le cheval trotteur ont permis de tester, par comparaison avec des mesures de VO_2, l'application de la relation VO_2/FC dans l'estimation de la dépense énergétique liée aux exercices. Cette quantification énergétique a été réalisée pour quatre principaux exercices, d'intensité, de volume, de types différents, utilisés dans l'entraînement des chevaux trotteurs. La comparaison des méthodes de quantification énergétique (VO_2 et FC) a montré une absence de différence significative en termes de dépense énergétique totale des exercices promenade, jogging, parcours et interval ($P > 0,05$). Néanmoins, l'étude plus approfondie des résultats indique que la dépense énergétique estimée à partir de la FC et de la relation VO_2/FC tend à être inférieure à la dépense énergétique obtenue avec la VO_2 pour l'exercice jogging ($P = 0,07$) et significativement inférieure pour les phases d'échauffement ($P = 0,05$) et d'exercice du parcours ($P = 0,04$). Le pourcentage d'erreur dans notre estimation de la dépense énergétique avec la FC est de -30 à +15 % comparé à la dépense énergétique mesurée avec la VO_2. Bien que ces pourcentages d'erreur semblent comparables à ceux rapportés chez l'homme (-17 à +20 %) (Spurr *et al.*, 1988 ; Livingstone *et al.*, 1990 ; Bitar *et al.*, 1996), nos résultats indiquent que la méthode à partir de la FC sous-estime davantage la dépense énergétique chez nos chevaux trotteurs par rapport à l'homme. De plus, nos résultats montrent une grande variabilité de dépense énergétique entre nos chevaux trotteurs, ce qui est confirmé par un effet cheval significatif pour l'exercice parcours lors de la quantification énergétique. Ces résultats confirment alors l'intérêt d'établir une relation individuelle VO_2/FC pour plus de précision dans l'approche de la dépense énergétique liée aux exercices, comme cela est préconisé chez l'homme (Spurr *et al.*, 1988). De plus, cette relation étant directement influencée par les effets de l'entraînement, il semblerait nécessaire de la réévaluer régulièrement, soit environ toutes les quatre semaines en fonction des entraînements menés.

Notre comparaison de méthode de quantification énergétique a montré que la fréquence cardiaque peut être utilisée, malgré un risque de sous-estimation, pour estimer la consommation d'oxygène et la dépense énergétique totale des exercices, sous condition d'avoir individuellement établie la relation VO_2/FC. La mise en place de cette méthode alternative pourrait alors être appliquée à de nombreuses autres disciplines équestres, bien qu'elle nécessite des travaux supplémentaires pour affiner la modélisation de la relation VO_2/FC.

Nos résultats confirment l'intérêt d'investiguer la dépense énergétique spécifique à chaque exercice. En effet, au cours des exercices d'intensité variée comme la promenade et l'interval, la dépense énergétique était significativement différente, qu'elle soit mesurée à partir de VO_2 [3014 ± 688 kcal (12819 ± 2883 kJ) *vs.* 4328 ± 816 kcal (18119 ± 3417 kJ) ; $P = 0,0009$; respectivement] et ou de FC [3339 ± 1910 kcal (14207 ± 7998 kJ) *vs.* 4024 ± 1024 kcal (16848 ± 4286 kJ); $P = 0,05$; respectivement]. Néanmoins, l'étude plus approfondie des résultats confirme que l'intensité n'est pas le seul paramètre faisant varier la dépense énergétique. La durée et la combinaison durée/intensité

impactent directement la dépense énergétique de l'exercice. Par exemple, la promenade, réalisée à faible intensité pendant 50 min, induit une dépense énergétique pas significativement différente de l'exercice parcours évaluée à partir de la mesure de VO_2 [3014 ± 688 kcal (12819 ± 2883 kJ) *vs.* 3272 ± 639 kcal (13689 ± 2676 kJ) respectivement] et de la mesure de FC [3339 ± 1910 kcal (14207 ± 7998 kJ) *vs.* 2816 ± 972 kcal (11789 ± 4070 kJ) respectivement]. Ces résultats, en accord avec les connaissances établies chez l'homme (Laville, 2006) mais aussi avec les premières conclusions chez les chevaux de selle et de trait (Vermorel *et al.*, 1984), confirment que la dépense énergétique augmente rapidement avec l'intensité de l'effort mais également lorsqu'un exercice d'intensité modérée se prolonge. L'exercice interval de type intermittent induit une dépense énergétique totale [4328 kcal (18119 kJ)] qui est 1,3 ; 1,4 et 1,6 fois supérieure aux exercices continus de jogging, promenade et parcours respectivement. Néanmoins, rapporté au poids de l'animal et par minute, l'exercice interval induit une dépense énergétique comparable au jogging et au parcours ($P > 0,05$). Ces derniers résultats semblent en accord avec les données chez l'homme, où certains auteurs ont montré une absence de différence de dépense énergétique totale (exprimée en kJ/kg/min) entre deux exercices réalisés au même pourcentage de VO_2, malgré le caractère intermittent de l'un et continu de l'autre (Christmass *et al.*, 1999). Ces mêmes auteurs ont néanmoins précisé que le type d'exercice avait un effet sur l'oxydation des substrats, en particulier celles des acides gras et des hydrates de carbones lors d'un exercice intermittent par rapport à un exercice continu. A notre connaissance, l'étude de l'oxydation des substrats par une approche comparée exercices continu *vs.* intermittent n'a jamais été investiguée chez les chevaux athlètes.

Nos travaux confirment que les caractéristiques des exercices sont les premiers facteurs extrinsèques de variation de la dépense énergétique liée aux exercices d'entraînement chez le cheval trotteur. Il semble donc important de distinguer précisément les caractéristiques de l'entraînement pour avoir une estimation de la dépense énergétique la plus juste possible.

La quantification de la dépense énergétique à partir de la consommation d'oxygène, qu'elle soit mesurée ou estimée, implique que les filières aérobies fournissent majoritairement l'énergie nécessaire à l'exercice. Néanmoins, en début d'exercice et à partir d'une certaine intensité et durée d'effort, le métabolisme anaérobie vient s'ajouter au métabolisme aérobie dans la fourniture de l'ATP. Faute de méthode suffisamment fiable permettant d'estimer précisément le potentiel anaérobie, nous n'avons quantifié que la contribution du métabolisme aérobie lors des quatre exercices d'entraînement chez les chevaux trotteurs.

Nous avons cependant tenté d'approcher la contribution anaérobie en mesurant les concentrations en lactate post-effort. Lors des exercices de faible intensité comme la promenade et le jogging, les concentrations sanguines en lactate étaient comparables aux valeurs de repos (inférieures à 1 mmol/l), indiquant une contribution anaérobie très faible voire quasi nulle lors de ces deux exercices. Pour les

exercices parcours et interval, d'intensité plus élevée que les précédents, des valeurs de 5,3 ± 5,1 et 6,0 ± 5,3 mmol/l ont été relevées respectivement. Bien que ces valeurs soient relativement éloignées des valeurs maximales obtenues chez les chevaux trotteurs [approximativement 24 mmol/l (Pösö *et al.*, 1995)], nous pouvons en déduire que le métabolisme anaérobie contribue, probablement de manière minimale, à la production totale d'énergie lors de ces deux exercices. Le métabolisme aérobie apparaît être le système dominant dans la production d'énergie lors des quatre exercices réalisés sur nos chevaux trotteurs, bien qu'une sous-estimation de la contribution anaérobie soit possible pour les exercices parcours et interval.

Chez l'homme, la mesure des concentrations en lactate permet en outre d'approcher la quantification de l'énergie anaérobie grâce à un équivalent calorique pour le lactate (Di Prampero et Ferretti, 1999 ; Bertuzzi *et al.*, 2013). Comme nous l'avons vu précédemment dans l'état de l'art, il n'existe à ce jour aucun équivalent énergétique du lactate chez le cheval, bien que cette approche soit potentiellement la plus adaptée à une utilisation chez le cheval en conditions de terrain.

D'autres méthodes basées sur la mesure de la consommation d'oxygène ont été développées chez l'homme puis appliquée au cheval, principalement en conditions de laboratoire. En effet, lors d'un exercice à intensité constante, même s'il est sous-maximal, la consommation d'oxygène prend un certain temps avant d'atteindre un état stable et d'assurer ainsi 100 % de l'énergie requise pour effectuer cet exercice. Pourtant, l'énergie requise est nécessaire dès le début de l'exercice. Il y a donc eu un déficit en oxygène ou déficit maximal d'oxygène accumulé (DMOA, en anglais MAOD) temporaire comblé par le métabolisme anaérobie. Ce déficit est calculé comme la différence entre le niveau d'oxygène requis pour un exercice d'intensité donnée et la quantité d'oxygène consommé à un instant donné (Medbo, 1988 ; Bangsbo *et al.*, 1990 ; Eaton *et al.*, 1995). Lorsque l'exercice est supra-maximal *i.e.* l'énergie requise est supérieure à VO_{2max}, le déficit se maintient pour toute la durée de l'exercice. Quoiqu'il en soit, à la fin de l'exercice, même si l'individu cesse toute activité, même si l'énergie requise redescend au niveau de repos, la consommation d'oxygène prend un certain temps avant de revenir à des valeurs de repos (Margaria *et al.*, 1933). C'est ce qui est considéré comme une dette en oxygène ou excès de consommation d'oxygène post-exercice (EPOC). La mesure de l'EPOC peut également être utilisée pour estimer la contribution énergétique d'origine anaérobie (Margaria *et al.*, 1933) à partir de l'hypothèse selon laquelle l'EPOC refléterait le DMOA. Les postulats sur lesquels reposent la quantification de la dette et du déficit en oxygène, pour estimer la contribution anaérobie, sont relativement discutés. Néanmoins, il semble exister un consensus selon lequel, en dépit des limites inhérentes à chaque méthode, elles constituent les seuls indicateurs du potentiel anaérobie. Nous ne rentrerons pas dans les détails des limites des méthodes DMOA et EPOC, mais nous nous attarderons davantage sur leur application chez le cheval à l'exercice en conditions de terrain.

A notre connaissance, seuls Hanack *et al.* (2001) ont tenté de quantifier l'EPOC en conditions de terrain en mesurant les échanges respiratoires pendant 10 min post-effort chez des chevaux de selle. Les auteurs ont conclu que cette durée était insuffisante pour obtenir l'EPOC total. En effet, Rose *et*

al. (1988) ont mesuré l'EPOC chez des chevaux Pur-Sang lors d'un exercice sur tapis roulant et ont enregistré les échanges respiratoires jusqu'à 60 min post effort. Néanmoins, nous ne connaissons pas la durée optimale pour quantifier l'EPOC totale chez le cheval. D'ailleurs chez l'homme, il a été reporté que la durée de l'EPOC pouvait durer de quelques minutes à plusieurs heures (Maehlum *et al.*, 1986) suivant les caractéristiques de l'exercice (Borsheim et Bahr, 2003). De plus, la mesure de l'EPOC nécessite, dès l'arrêt de l'exercice, que le sujet soit immobilisé, afin de ne pas occasionner de dépense supplémentaire. La mesure de l'EPOC chez le cheval trotteur en conditions de terrain semble délicate d'un point de vue pratique, faute de pouvoir maintenir un cheval immobile pendant une heure immédiatement après un effort.

La méthode DMOA a également été utilisée chez le cheval par Rose *et al.* (1988) et par Eaton *et al.* (1995) pour mesurer la capacité anaérobie de chevaux sur tapis roulant. Au cours de ces deux études, deux tests avec un analyseur fixe des échanges gazeux ont été menés. Le premier test avait pour objectif de déterminer VO_{2max} et le second d'évaluer la contribution anaérobie lors d'un test réalisé à 120 % (Rose *et al.*, 1988) et 115 % de VO_{2max} (Eaton *et al.*, 1995). A notre connaissance, cette méthode n'a jamais été utilisée en conditions de terrain chez les chevaux, probablement car elle nécessite d'évaluer précisément VO_{2max} des chevaux, conditionnant la pertinence des résultats du déficit en O_2. Néanmoins, avec la récente validation de l'analyseur portable des échanges gazeux, la mesure du DMOA semble réalisable en conditions de terrain, bien qu'elle ne permette d'investiguer que des exercices à une intensité supra-maximale *i.e.* supérieure à VO_{2max}. Dans notre étude, les deux exercices d'intensité élevée ont été réalisés à 88,3 ± 16 et à 88,3 ± 20 % de VO_{2pic} pour l'interval et le parcours respectivement, ne permettant pas d'approcher la mesure du déficit en O_2 par la méthode DMOA.

Au cours des exercices d'entraînement du cheval trotteur, nos résultats indiquent une large et dominante contribution du système aérobie dans la fourniture d'énergie. Néanmoins, la mesure de la concentration en lactate sanguin, témoin chimique de l'anaérobiose, indique une contribution anaérobie minimale lors des exercices parcours et interval.

3. L'estimation de la dépense énergétique totale du cheval trotteur

La quantification des principales composantes de la dépense énergétique totale, à savoir l'énergie indispensable au métabolisme de base et à l'activité physique, permet d'approcher une couverture optimale des besoins en énergie du cheval trotteur à l'entraînement. La dépense énergétique totale est couramment rapportée à la journée (DE de 24 h) et est calculée à partir des dépenses énergétiques liées au métabolisme de base auxquelles il convient d'ajouter un coefficient multiplicateur en fonction du niveau d'activité physique. Ce coefficient est, autant chez l'homme que chez le cheval, un multiple des besoins liés au métabolisme de base (Vermorel *et al.*, 1984 ; Martin, 2001 ; NRC, 2007). Dans cette dernière partie, nous tenterons d'approcher une estimation de la dépense énergétique totale du cheval trotteur à l'entraînement dans un souci de contribution à la précision des besoins énergétiques spécifiques à la discipline du trot.

Les mesures du métabolisme de base montrent une très grande variabilité inter-individuelle. Cette variabilité principalement liée au sexe, à l'âge et au statut d'entraînement des individus, s'explique en grande partie par des différences de masse maigre autant chez l'homme (Nelson *et al.*, 1992 ; Tappy et Guenat, 2000) que chez le cheval (Kearns *et al.*, 2002). En effet, il a été démontré que le métabolisme de base croît proportionnellement à la masse corporelle et plus précisément en fonction des proportions variables de masse maigre et de masse grasse (Owen, 1988). La masse corporelle représente les organes et tissus dont le métabolisme diffère considérablement (Weinsier *et al.*, 1992). Le tissu adipeux en particulier contribue de manière variable à la masse corporelle totale et est caractérisé par des dépenses énergétiques relativement faibles. Au contraire, la masse dite «non grasse» ou «maigre» de l'organisme correspond aux parenchymes des organes et aux muscles et est caractérisée par des dépenses énergétiques nettement plus élevées. Lorsque le métabolisme de base est exprimé en fonction de la masse grasse plutôt que de la masse corporelle totale, la variabilité inter-individuelle est réduite dans une proportion importante (Owen, 1988). Bien que la masse maigre détermine la dépense énergétique de repos de façon plus précise, il n'existe pas, à ce jour, d'équation satisfaisante permettant d'estimer le métabolisme de base à partir de la masse maigre chez l'homme et chez le cheval.

Chez l'homme, la dernière version des apports nutritionnels recommandés pour la population française (ANC, 2001) propose d'estimer le métabolisme de base à partir d'équations précédemment validées comme celles de Harris-Benedict (1919) ou plus précisément celles de Black *et al.* (1996). Cette dernière, d'une meilleure précision, tient compte du sexe, du poids corporel (P) en kg, de la taille (T) en m et de l'âge (A) en années, pour des sujets en bonne santé et d'âge inférieur à 75 ans :

$$\text{Pour les femmes : métabolisme de base} = 0{,}963 \times P^{0,48} \times T^{0,50} \times A^{-0,13}$$

$$\text{Pour les hommes : métabolisme de base} = 1{,}083 \times P^{0,48} \times T^{0,50} \times A^{-0,13}$$

De plus, plusieurs travaux ont montré que la pratique d'exercice répété entraîne une augmentation du métabolisme de base (Sjödin *et al.*, 1996) qui peut s'expliquer par un accroissement de la synthèse protéique, une augmentation de la masse musculaire mais également par une stimulation de la synthèse d'enzymes oxydatives et de la prolifération des mitochondries dans les groupes musculaires concernés (Whipp et Sargeant, 1999). Bien que les équations d'estimation du métabolisme de base tiennent compte des données individuelles, aucune majoration n'est appliquée pour estimer le métabolisme de base de sportifs. Néanmoins, les travaux de Sjödin *et al.* (1996) ont indiqué que le métabolisme de base d'athlètes en endurance de haut niveau était significativement supérieur aux calculs théoriques (16 % ; $P < 0,05$).

Chez le cheval, les différents systèmes alimentaires établis s'accordent pour estimer le métabolisme de base en fonction du poids métabolique ($PV^{0,75}$) qu'il convient de majorer selon le sexe, la race et les phases d'élévation du métabolisme de base (reproduction, gestation, lactation, périodes de travail/repos). Les chevaux entiers ont des besoins d'entretien plus élevés que les hongres [de 10 à 15 % selon Nadal'jak (1961)] et les juments des besoins sensiblement inférieurs (Kossila *et al.*, 1972). Néanmoins, il n'existe pas d'équation spécifique permettant d'estimer le métabolisme de base des entiers, hongres ou femelles. Concernant la race des chevaux, la majoration appliquée présente des variations de 10 % (Vermorel *et al.*, 1984 ; Coenen *et al.*, 2011 ; Martin-Rosset, 2012) ou 20 % (NRC, 2007) pour les chevaux dits « de sang » c'est à dire les chevaux de course trotteurs ou galopeurs. De plus, les systèmes proposent également une majoration du métabolisme de base en fonction de l'activité physique des chevaux. Les travaux de Kearns *et al.* (2002) ont apporté de nouvelles informations concernant la composition corporelle de chevaux non entraînés et entraînés. Il est ainsi proposé d'augmenter le métabolisme de base de 15 % chez un cheval entraîné par rapport à un cheval non entraîné, du fait d'un pourcentage de masse maigre plus important. Le système NRC indique qu'il est possible d'augmenter les besoins énergétiques liés au métabolisme de base de 10 % pour des chevaux athlètes, bien qu'une augmentation de 20 % semble être plus adaptée notamment lorsque les chevaux sont transportés durant de longues distances pour aller en compétition. Le récent ouvrage de Martin-Rosset (2012) propose une augmentation de 30 à 40 % des besoins liés au métabolisme de base pour des chevaux de sang entraînés.

Selon ces précédents travaux et les différents facteurs de variation, le métabolisme de base d'un cheval trotteur hongre à l'entraînement de 475 kg serait compris entre 10674 kcal par jour (soit 22,5 kcal/kg PV) et 12382 kcal par jour (26,1 kcal/kg PV) (Tableau 17).

Tableau 18. Estimation du métabolisme de base (MB) d'un cheval de sang (trotteur) hongre de 475 kg en fonction de son poids vif (PV) rapporté au poids métabolique et des majorations en fonction de la race et de l'entraînement (d'après Vermorel *et al.*, 1984 ; NRC, 2007 ; Coenen *et al.*, 2011 et Martin-Rosset, 2012).

Références	Poids métabolique	Majoration (%)	Type de majoration	MB (kcal)
Vermorel *et al.*, 1984	$PV^{0,75}$	10 15	Race Entraînement	10674 [2250* x (0,0373 x $475^{0,75}$) + 10 % + 15 %]
Martin-Rosset, 2012	$PV^{0,75}$	10 35	Race Entraînement	12382 [2250* x (0,0373 x $475^{0,75}$) + 10 % + 35 %]
NRC, 2007	$PV^{0,75}$	20 20	Race Entraînement	11956 [2250* x (0,0373 x $475^{0,75}$) + 20 % + 20 %]
Coenen *et al.*, 2011	$PV^{0,75}$	10 15	Race Entraînement	10674 [2250* x (0,0373 x $475^{0,75}$) + 10 % + 15 %]

* Valeur d'une Unité Fourragère Cheval (UFC) exprimée en kcal.

Les différents systèmes existants proposent d'estimer le métabolisme de base des chevaux en fonction de majorations liées à la race, au sexe et au niveau d'activité physique. A termes, il pourrait être imaginé de se rapprocher de l'estimation du métabolisme de base faite chez l'homme, où les équations définies intègrent des paramètres individuels tels que le genre et l'âge des individus. Ainsi pour des chevaux entraînés de race trotteur, il est conseillé d'augmenter de 25 à 45 % les besoins liés au métabolisme de base. Le métabolisme de base journalier d'un cheval trotteur de 475 kg serait compris entre 10674 et 12382 kcal (22,5 et 26,1 kcal/kg PV).

La détermination des coefficients multiplicateurs en fonction de l'activité physique des chevaux nécessite de prendre en compte chaque exercice pratiqué dans l'entraînement auquel il convient d'appliquer la fréquence de répétition quotidienne de l'exercice.

Dans la publication 1, nous avons constaté que les exercices promenade, jogging et interval sont répétés une seule fois au cours d'une même séance. L'exercice parcours est quant à lui répété une ou deux fois par séance suivant les entraîneurs, soit en moyenne 1,4 fois. Le tableau 18 présente ainsi notre estimation de la dépense énergétique pour les exercices promenade, jogging, parcours et interval, à laquelle nous avons appliqué la répétition des exercices par séance.

Tableau 19. Dépense énergétique (DE en kcal) liée aux quatre exercices spécifiques utilisés chez les chevaux trotteurs par séance de travail.

	DE calculée (kcal)	Répétition de l'exercice /séance	DE /séance (kcal)
Promenade	3014 ± 689	1	3014 ± 689
Jogging	2656 ± 239	1	2656 ± 239
Parcours	3272 ± 639	1,4	4581 ± 895
Interval	4328 ± 816	1	4328 ± 816

Nous avons proposé des coefficients multiplicateurs, exprimés en multiples des besoins liés au métabolisme de base, pour chaque exercice d'entraînement chez le cheval trotteur (Tableau 19). Les exercices promenade, jogging, parcours et interval induisent une augmentation moyenne de 1,26 – 1,23 – 1,39 et 1,39 fois la dépense énergétique du métabolisme de base pendant les quatre exercices respectivement. Ces coefficients ont été déterminés par mesures directes de la consommation d'oxygène en conditions réelles d'exercice, ce qui, à notre connaissance n'avait jamais été réalisé. En effet, l'estimation de la dépense énergétique liée à l'exercice proposée par les systèmes actuels de recommandations énergétiques repose sur des équations d'estimations de la consommation d'oxygène précédemment établies sur des chevaux exerçant sur tapis roulant en conditions de laboratoire. Les réponses cardiorespiratoires enregistrées lors de test sur tapis roulant sont inférieures à celles mesurées au cours du même test sur le terrain autant chez l'homme (Iaiche *et al.*, 1996) que chez le cheval (Sloet van Oldruitenborgh-Osterbaan et Barneveld, 1995 ; Gottlieb-Vedi et Lindholm, 1997). Ces différences peuvent être attribuées aux facteurs aérodynamiques, climatiques (résistance de l'air à l'avancement, vent, température, humidité) mais également au fait que les conditions de laboratoires ne reflètent pas toujours les sollicitations en conditions réelles d'exercice, comme le fait de tracter une charge de 80 kg pour le cheval trotteur attelé (Gottlieb-Vedi et Lindholm, 1997). Des pourcentages d'élévation de la pente du tapis roulant sont préconisés pour accroitre la résistance et atténuer les différences de performances obtenues lors de ces deux conditions. Il est couramment admis une inclinaison de 1 à 2 % de la pente du tapis roulant ou une augmentation de la vitesse de 10 % pour obtenir la même sollicitation cardiorespiratoire que sur le terrain chez les chevaux (Sloet van Oldruitenborgh-Osterbaan et Barneveld, 1995). Bien que ces préconisations permettent d'estomper les différentes sollicitations physiologiques, il a été démontré que la locomotion des chevaux exerçant sur tapis roulant était différente. En effet, la fréquence de foulées au trot et galop de même vitesse étaient plus importantes sur piste que sur tapis roulant (Barrey *et al.*, 1993), induisant un coût énergétique plus élevé. Ainsi, l'utilisation des équations précédemment établies sur tapis roulant pour estimer la consommation d'oxygène et la dépense énergétique nécessite beaucoup de précaution, d'autant plus si ces équations sont utilisées pour une application sur le terrain.

Tableau 20. Coefficients multiplicateurs exprimés en multiples des besoins liés au métabolisme de base, estimés par les systèmes de recommandations, pour chaque exercice d'entraînement chez le cheval trotteur.

Références	Promenade	Jogging	Parcours	Interval
Vermorel *et al.*, 1984	1,28	1,25	1,40	1,40
Martin-Rosset, 2012	1,24	1,21	1,37	1,35
NRC, 2007	1,25	1,22	1,38	1,40
Coenen *et al.*, 2011	1,28	1,25	1,40	1,40
Moyenne (± ET)	**1,26 (± 0,02)**	**1,23 (± 0,02)**	**1,39 (± 0,01)**	**1,39 (± 0,02)**

ET : Ecart type.

En comparaison avec les systèmes de recommandations alimentaires actuels, les coefficients multiplicateurs pour l'activité physique varient de 1,3 à 2,0 pour le système français et de 1,2 à 1,9 pour le système américain. Ces coefficients correspondent à une activité physique dite « très légère » à « très élevée ». Nos résultats suggèrent que les exercices d'entraînement utilisés chez les chevaux trotteurs correspondent à une activité dite « très légère » à « modérée » (Tableau 20), ce qui au regard des caractéristiques de certains exercices semble faible.

Tableau 21. Classification des activités physiques chez le cheval trotteur attelé, en multiples de la dépense du métabolisme de base (d'après Vermorel *et al.*, 1984 ; NRC, 2007).

NRC, 2007		**Vermorel *et al.*, 1984**		**Résultats issus de ce travail de thèse**	
Multiple de la DE entretien	**Activités**	**Multiple de la DE entretien**	**Activités**	**Multiple de la DE entretien**	**Exercices**
1,2	« Light »	1,3	Très légère	1,23 1,26	Jogging Promenade
1,4	« Moderate »	1,7	Légère	1,39 1,39	Interval Parcours
1,6	« Heavy »	1,8	Modérée		
1,9	« Very heavy »	1,9	Elevée		
		2	Très élevée		

Ces faibles valeurs peuvent s'expliquer par plusieurs facteurs pouvant affecter les calculs du métabolisme de base et/ou de la dépense énergétique liée aux exercices d'entraînement.

Comme indiqué précédemment, les systèmes actuels proposent d'estimer le métabolisme de base de chevaux athlètes en fonction du sexe, de la race et du statut d'entraînement. Les pourcentages de majorations préconisés par les systèmes peuvent varier de 25 à 45 %, induisant des estimations du métabolisme de base variant de 10674 à 12382 kcal par jour. Malgré ces variations, les coefficients multiplicateurs proposés pour les exercices d'entraînement du cheval trotteur, exprimés en fonction des besoins énergétiques liés au métabolisme de base, sont relativement proches pour les quatre systèmes avec des écarts types faibles (< 5 %) (Tableau 19). Bien que les travaux précédemment menés pour estimer le métabolisme de base des chevaux entraînés présentent des valeurs pouvant varier de 1700 kcal par jour, cette variation semble peu impacter le calcul des coefficients multiplicateurs pour l'activité physique.

En outre, notre estimation de la dépense énergétique liée aux exercices d'entraînement chez le cheval trotteur pourrait être sous-estimée compte tenu de l'adaptation nécessaire de certaines caractéristiques d'exercice au niveau de condition physique de nos trotteurs. La durée du jogging a été réduite à 30 min et le nombre d'échauffement pour le parcours et l'interval a été limité à un seul. Sans ces adaptations, il est fort probable que les dépenses énergétiques induites par ces trois exercices soient supérieures à celles que nous avons quantifiées. De plus, les différences observées entre nos coefficients multiplicateurs liée aux exercices et ceux proposés par les systèmes de recommandations peuvent également s'expliquer par le fait que nous n'avons mesuré que la part aérobie dans la fourniture de l'énergie pour chaque exercice. Les systèmes ont quant à eux tenté d'estimer la part anaérobie dans la fourniture d'énergie à partir de travaux antérieurs ayant estimé la dette en oxygène contractée lors d'exercice (Vermorel *et al.*, 1984).

Les exercices d'entraînement réalisés par les chevaux trotteurs attelés induisent une augmentation des besoins en énergie de 1,23 à 1,39 fois les besoins d'entretien suivant les caractéristiques des exercices.

Pour conclure, nous allons tenter d'approcher la dépense énergétique totale de 24 h du cheval trotteur à l'entraînement *i.e.* la dépense énergétique liée au métabolisme de base plus la dépense énergétique liée à l'activité physique.

A l'échelle de la semaine, chaque exercice d'entraînement dispose d'une fréquence hebdomadaire identifiée lors de notre enquête terrain dans la publication 1 (Tableau 21). Cette fréquence hebdomadaire permet d'approcher la dépense énergétique liée à l'activité physique pour une semaine type d'entraînement qui s'élève à 21481 kcal (89937 kJ) soit une dépense journalière moyenne de 3070 kcal (12853 kJ) liée à l'activité physique. Ainsi, les besoins énergétiques générés par

l'entraînement des chevaux trotteurs correspondent à environ 1,30 fois les besoins d'entretien. Néanmoins, ces estimations de tiennent pas compte des activités physiques complémentaires réalisées par les chevaux trotteurs à l'entraînement comme les courses, le marcheur ou encore l'exercice libre au paddock. Pour davantage de précision dans l'estimation des besoins en énergie des chevaux trotteurs, ces activités nécessitent d'être investiguées afin de quantifier la dépense énergétique qu'elles induisent. Dans ce travail de thèse, nous n'avons pas pu quantifier la dépense énergétique au cours de ces trois activités sur nos chevaux trotteurs principalement pour des raisons pratiques et de sécurité pour l'appareil portable de mesure des échanges gazeux.

Tableau 22. Dépense énergétique par séance de travail et hebdomadaire (DE en kcal) liée aux quatre exercices spécifiques utilisés chez les chevaux trotteurs.

	DE /séance (kcal)	**Répétition de l'exercice /semaine**	**DE hebdomadaire /exercice (kcal)**
Promenade	3014 ± 689	1,9	5727 ± 1309
Jogging	2656 ± 239	1,2	3187 ± 287
Parcours	4581 ± 895	1,6	7330 ± 1432
Interval	4761 ± 898	1,1	5237 ± 988

Ainsi, d'après les systèmes actuels de recommandations estimant les besoins énergétiques liés au métabolisme de base et nos travaux de quantification de la dépense énergétique liée aux principaux exercices d'entraînement, la dépense énergétique totale de 24 h d'un cheval trotteur entraîné de 475 kg pourrait varier de 13744 à 15454 kcal par jour (soit 28,9 à 32,5 kcal/kg PV). A cette première estimation de la dépense énergétique totale de 24 h, il conviendrait d'ajouter les dépenses énergétiques supplémentaires telles que celles liées à la thermogénèse alimentaire.

En moyenne, l'activité physique réalisée au cours d'une semaine type d'entraînement chez un cheval trotteur induit une augmentation de ces besoins en énergie de 1,30 fois les besoins d'entretien. D'après les travaux précédemment menés sur l'estimation des besoins énergétiques liés au métabolisme de base du cheval entraîné et nos premiers résultats de dépense énergétique liée à l'activité physique, nous travaux permettent d'approcher une estimation de la dépense énergétique totale de 24 h pour un cheval trotteur à l'entraînement.

CONCLUSION & PERSPECTIVES

Ce travail de thèse s'est inséré dans la problématique de l'équipe de cherche URANIE-USC Nutrition du Cheval Athlète, soutenue par l'INRA, visant à préciser et compléter les connaissances sur les besoins énergétiques des chevaux athlètes. Nous avons choisi de travailler sur la discipline du trot attelé et d'étudier la dépense énergétique liée aux exercices spécifiques utilisés dans la discipline.

Notre quantification énergétique liée aux exercices d'entraînement du cheval trotteur a été réalisée à partir de données cardiorespiratoires en conditions de terrain c'est-à-dire à partir de la consommation d'oxygène et de la fréquence cardiaque. L'utilisation du système portable K4b² équin et l'Equimask a permis d'explorer les réponses adaptatives à l'exercice aigu chez le cheval trotteur et a apporté des données de consommation d'oxygène et de fréquence cardiaque pertinentes jusqu'à des vitesses de course élevées (12 m/s). Outre son utilisation à des fins de quantification énergétique chez le cheval athlète, ce système est un outil précieux au service de la physiologie de l'exercice équine, et pourquoi pas à l'avenir, au service des entraîneurs pour évaluer les capacités des chevaux.

A ce jour, compte tenu des limites de l'utilisation du K4b² équin en conditions réelles d'exercice, nous avons proposé d'estimer la dépense énergétique à partir de la fréquence cardiaque d'effort. En effet, la simplicité de sa mesure en fait un paramètre pratique et facilement mesurable en toutes conditions. La comparaison de méthodes d'estimation de la dépense énergétique, mesures de consommation d'oxygène *vs.* mesures de fréquence cardiaque, a montré que la fréquence cardiaque peut être utilisée pour approcher la dépense énergétique liée aux principaux exercices d'entraînement, malgré un risque de sous-estimation. Bien que l'utilisation de la fréquence cardiaque permette de suivre les adaptations à un exercice aigu, elle nécessite d'étalonner auparavant la régression individuelle VO_2/FC lors d'un test incrémental. Le test incrémental continu mis en place dans ce travail a été adapté au cheval trotteur attelé et a permis d'établir la courbe individuelle VO_2/FC. Il semblerait intéressant de poursuivre ces travaux afin de valider scientifiquement ce test d'effort en comparant les réponses cardiorespiratoires obtenues au cours de notre test et au cours d'un test d'effort de référence. Au-delà de l'application pour établir la relation VO_2/FC, ce test incrémental continu pourrait être utilisé dans l'entraînement des chevaux trotteurs afin d'évaluer, aux périodes clés de la saison sportive, le niveau de condition physique des chevaux mais aussi de suivre les effets d'un entraînement par une évaluation pré et post entraînement, comme c'est le cas chez les sportifs humains.

Afin de préciser la quantification de la dépense énergétique totale du cheval trotteur, principalement composée de l'énergie indispensable au métabolisme de base et à l'activité physique, nous avons proposé d'estimer dépense énergétique journalière (DE de 24 h) du cheval trotteur à l'entraînement. Ainsi la DE de 24 h est composée du métabolisme de base auquel il convient d'ajouter un coefficient multiplicateur en fonction du niveau d'activité physique. Nos travaux ont permis de proposer des coefficients spécifiques aux chevaux trotteurs en fonction des exercices utilisés dans l'entraînement : la promenade, le jogging, le parcours et l'interval. Les coefficients de majoration obtenus correspondent à 1,26 – 1,23 – 1,39 et 1,39 fois les besoins d'entretien pour les exercices promenade, jogging, parcours et interval respectivement. En moyenne, une semaine type d'entraînement chez un

cheval trotteur nécessite une augmentation de ces besoins en énergie de 1,30 fois les besoins d'entretien. Toutefois, ces résultats ont été obtenus sur des chevaux trotteurs maintenus en situation expérimentale contrôlée de niveau physique inférieur aux chevaux trotteurs de course. Nous avons ainsi adapté certaines caractéristiques d'exercices aux capacités de nos chevaux (durée d'exercice réduite pour le jogging et réalisation d'un seul échauffement lors du parcours et de l'interval). De plus, l'utilisation de la consommation d'oxygène, mesurée ou estimée, suggère que la dépense énergétique est entièrement oxydative. Or, nous ne sommes pas en mesure d'affirmer ceci, bien que la mesure des concentrations sanguines en lactate, témoin de la glycolyse anaérobie, suggère une contribution minimale du métabolisme anaérobie dans la fourniture d'énergie aux cours des exercices d'entraînement du cheval trotteur. De plus, il semblerait intéressant d'investiguer l'ensemble des activités physiques réalisées par un cheval trotteur à l'entraînement comme le marcheur, les courses et l'activité libre au paddock. En effet, comme nous l'avons indiqué dans notre publication 1, l'activité du marcheur, réalisée en guise de pré échauffement pendant environ 20 min par les entraîneurs de Grosbois pourrait représenter une dépense énergétique supplémentaire non négligeable. De même, les courses au nombre moyen de deux par mois et l'activité libre au paddock estimée à 2h16 ± 47 min par semaine induisent également des dépenses énergétiques supplémentaires chez le cheval trotteur à l'entraînement. Des travaux complémentaires sont ainsi nécessaires pour préciser les dépenses énergétiques induites par ces activités, permettant de compléter les coefficients multiplicateurs proposés dans ce travail. La mesure de la consommation d'oxygène avec le K4b² équin et l'Equimask lors des activités (marcheur, course et paddock) semble difficilement utilisable, compte tenu des risques pour l'appareil et des limites précédemment évoquées à l'utilisation de cet appareil portable en conditions non expérimentales. Toutefois, l'utilisation de la fréquence cardiaque et de la relation VO_2/FC pourrait être la méthode d'estimation de la dépense énergétique la plus pertinente dans de telles activités.

La précision de la dépense énergétique liée à l'activité physique et sportive du cheval trotteur attelé nécessite d'être ajustée en fonction des caractéristiques de l'entraînement permettant d'estimer une dépense énergétique spécifique à cette discipline. Cette estimation, venant s'ajouter aux autres postes de dépense énergétique, comme le métabolisme de base et la thermogénèse, permet d'approcher la dépense énergétique journalière d'un cheval trotteur à l'entraînement afin d'adapter les besoins nutritionnels énergétiques pour les équins. Des recommandations énergétiques spécifiques aux chevaux athlètes par discipline pourraient ainsi être développées. Elles présenteraient l'intérêt d'être adaptées aux chevaux athlètes et tiendraient compte des spécificités de chaque discipline, modulées en fonction de la durée et de l'intensité des entraînements et des compétitions. Ces recommandations énergétiques spécifiques aux chevaux athlètes semblent actuellement nécessaires pour d'assurer santé et performance sportive.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A

1. Ainslie, P., Reilly, T. and Westerterp, K., 2003. Estimating human energy expenditure: a review of techniques with particular reference to doubly labelled water. Sports Medicine 33, 683-698.
2. Ainsworth, D.M., 2008. Lower airway function: responses to exercise and training. In: Hinchcliff, K.W., Geor, R.J. and Kaneps, A. (eds) Equine Exercise Physiology. The Science of Exercise in the Athletic Horse. Saunders Elsevier, New York, USA, 193-209.
3. ANC (Apports Nutritionnels Conseillés), 2001. Lavoisier (ed), Tec et Doc, Paris.
4. Art, T., 2011. Applied training physiology. In: Proceedings of the 5th European Nutrition & Health Congress (EENHC). Warengem, Belgium, 33-49.
5. Art, T., Amory, H. and Lekeux, P., 2000. Basic exercise physiology. Praticien Vétérinaire Equine, 32, 247-254.
6. Art, T., Duvivier, D.H., Van Erck, E., De Moffarts, B., Votion, D., Bedoret, D., Lejeune, J.P., Lekeux, P. and Serteyn, D., 2006. Validation of a portable equine metabolic measurement system. Equine Veterinary Journal Supplement 36, 557-561.
7. Astorino, T., Rietschel, J., Tam, P., Taylor, K., Johnson, S., Freedman, T. and Sakarya, C.E., 2004. Reinvestigation of optimal duration of VO2max testing. Journal of Exercice Physiology Online 7, 1-8.

B

8. Balsom, P., Seger, J., Sjödin, B. and Ekblom, B., 1992. Maximal intensity intermittent exercise: effect of recovery duration. International Journal of Sports Medicine 13, 528-533.
9. Bangsbo, J., Gollnick, P., Graham, T., Juel, C., Kiens, B., Mizuno, M. and Saltin, B., 1990. Anaerobic energy production and O2 deficit-debt relationship during exhaustive exercise in humans. Journal of Physiology 442, 539-559.
10. Barrey, E., 1990. Modélisation du cheval à l'effort. Mise au point d'un simulateur sur un logiciel de calcul. Recueil de Médecine Vétérinaire 166, 1135-1144.
11. Barrey, E., Galloux, P., Valette, J., Auvinet, B. and Wolter, R., 1993. Stride characteristics of overground versus treadmill locomotion in the saddle horse. Acta Anatomica 146, 90-94.
12. Bayly, W., 1985. Training programs. Veterinary Clinics of North America Equine Practice 1, 597-610.
13. Bayly, W., Grant, B., Breeze, R. and Kramer, J., 1983. The effects of maximal exercise on acid-base balance and arterial blood gas tension in thoroughbred horses. In: Snow, D.H., Persson, S.G.B. and Rose, R.J. (eds) Equine Exercise Physiology. Cambridge,UK, 400-407.
14. Bayly, W., Hodgson, D., Schulz, D., Dempsey, J. and Gollnick, P., 1989. Exercise-induced hypercapnia in the horse. Journal of Applied Physiology 67, 1958-1966.
15. Bayly, W., Schultz, D., Hodgson, D. and Gollnick, P., 1987. Ventilatory responses of the horse to exercise: effect of gas collection systems. Journal of Applied Physiology 63, 1210-1217.
16. Beaver, W., Wasserman, K. and Whipp, B., 1986. A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. Journal of Applied Physiology 60, 2020-2027.
17. Bentley, D.J., Newell, J., Bishop, D., 2007. Incremental exercise test design and analysis: implications for performance diagnostics in endurance athletes. Sports Medicine 37, 575-586.
18. Bergstrom, J., Hermansen, L., Hultman, E. and Saltin, B., 1967. Diet, muscle glycogen and physical performance. Acta Physiologica Scandinavica 71, 140-150.
19. Berthoin, S., Blondel, N., Billat, V. and Gerbeaux, M., 2001. La vitesse à VO2max, signification et applications en course à pied. STAPS 54, 45-61.
20. Berthoin, S., Gerbeaux, M., Guerrin, F., Lensel-Corbeil, G., Turpin, E. and Vandendorpe, F., 1994. Comparison of two field tests to estimate maximum aerobic speed. Journal of Sports Sciences 12, 355-362.

21. Berthoin, S., Mantéca, F. and Gerbeaux, M., 1995. Effect of a 12 week training programme on maximal aerobic speed (MAS) and running time to exhaustion at 100% of MAS for students aged 14 to 17 years. Journal of Sports Medicine and Physical Fitness 35, 251-256.
22. Bertuzzi, R., Franchini, E., Kokubun, E. and Kiss, M., 2007. Energy system contributions in indoor rock climbing. European Journal of Applied Physiology 101, 293-300.
23. Bertuzzi, R., Nascimento, E., Urso, R., Damasceno, M. and Lima-Silva, A., 2013. Energy system contributions during incremental exercise test. Journal of Sports Science and Medicine 12, 454-460.
24. Betros, C., McKeever, K., Kearns, C. and Malinowski, K., 2002. Effects of ageing and training on maximal heart rate and VO2max. Equine Veterinary Journal Supplement 34, 100-105.
25. Bigard, X. and Guezennec, C., 1993. Fatigue périphérique, lactate musculaire et Ph intracellulaire. Sciences et Sports 8, 193-204.
26. Bishop, D., Jenkins, D. and Mackinnon, L., 1998. The effect of stage duration on the calculation of peak VO2 during cycle ergometry. Journal of Science and Medicine in Sport 1, 171-178.
27. Bitar, A., Vermorel, M., Fellmann, N., Bedu, M., Chamoux, A. and Coudert, J., 1996. Heart rate recording method validated by whole-body indirect calorimetry in 10-yr-old children. Journal of Applied Physiology 81, 1169-1173.
28. Black, A., Coward, W., Cole, T. and Prentice, A., 1996. Human energy expenditure in affluent societies: an analysis of 574 doubly-labelled water measurements. European Journal of Clinical Nutrition 50, 72-92.
29. Bompa, T.O. and Haff, G.G., 2009. Periodisation: theory and methodology of training. Human Kinetics, Champaigne, IL, USA.
30. Borsheim, E. and Bahr, R., 2003. Effect of exercise intensity, duration and mode on post-exercise oxygen consumption. Sports Medicine 33, 1037-1060.
31. Brue, F., 1985. Une variante du test progressif et maximal de lèger et Boucher: le test vitesse maximale aérobie derrière cycliste (test VMA). Bulletin Médical de la Fédération Française d'Athlètisme 7, 1-18.
32. Brughelli, M., Cronin, J. and Chaouachi, A., 2011. Effects of running velocity on running kinectics and kinematics. Journal of Strength and Conditioning Research 25, 933-939.
33. Buchfuhrer, M., Hansen, J., Robinson, T., Sue, D., Wasserman, K. and Whipp, B., 1983. Optimizing the exercise protocol for cardiopulmonary assessment. Journal of Applied Physiology 55, 1558-1564.
34. Buchheit, M., 2005. The 30-15 Intermittent Fitness test: reliability and implication for interval training of intermittent sport players. In: Proceedings of the 10th European Congress of Sport Science (ECSS). Belgrade, Serbia.
35. Bunc, V., Heller, J., Leso, J., Sprynarova, S. and Zdanowicz, R., 1987. Ventilatory threshold in various groups of highly trained athletes. International Journal of Sports Medicine 8, 275-280.
36. Buzas, A., Cawdell-Smith, A., Dryden, G. and Bryden, W., 2009. Physiological responses and energy expenditure of polocrosse horses during competition. In: Proceedings of the Equine Science Society. Keystone, Colorado, USA.

C

37. Campbell, E., 2011. Lactate-driven equine conditioning programmes. The Veterinary Journal, 190, 199-207.
38. Castagna, C., Impellizzeri, F., Chamari, K., Carlomagno, D. and Rampinini, E., 2006. Aerobic fitness and yo-yo continuous and intermittent tests performed in soccer players: a correlation study. Journal of Strength and Conditioning Research 20, 320-325.

39. Cazorla, G., 1990. Tests de terrain pour évaluer la capacité aérobie et la vitesse maximale aérobie. In: Cazorla, G. and Robert, G. (eds) L'évaluation en activité physique et en sport. AREAPS, Cestas, 151-174.
40. Ceesay, S., Prentice, A., Day, K., Murgatroyd, P., Goldberg, G., Scott, W. and Spurr, G.B., 1989. The use of heart rate monitoring in the estimation of energy expenditure: a validation study using indirect whole-body calorimetry. British Journal of Nutrition 61, 175-186.
41. Christmass, M., Dawson, B., Passeretto, P. and Arthur, P., 1999. A comparison of skeletal muscle oxygenation and fuel use in sustained continuous and intermitttent exercise. European Journal of Applied Physiology 80, 423-435.
42. Coenen, M., 2008. The suitability of heart rate in prediction of oxygen consumption, energy expenditure and energy requirement for exercising horse. In: Saastamoinen, M. and Martin-Rosset, W. (eds) Nutrition of the exercising horse. Wageningen Academic Publishers, The Netherlands, 311-331.
43. Coenen, M., 2010. Remarks on benefits of heart rate recordings. In: Proceedings of the 17th Feeding and veterinary management of the sport horse - Kentucky Equine Research Nutrition Conference, Lexington, KY, USA, 45-54.
44. Coenen, M., Kienzle, E., Vervuert, I. and Zeyner, A., 2011. Recent German Developments in the formulation of energy and nutrient requirements in horses and the resulting feeding recommendations. Journal of Equine Veterinary Science 31, 219-229.
45. Cottin, F., Metayer, N., Goachet, A., Julliand, V., Slawinski, J., Billat, V. and Barrey, E., 2010. Oxygen consumption and gait variables of Arabian endurance horses measured during a field exercise test. Equine Veterinary Journal Supplement 42, 1-5.
46. Couroucé, A., 1993. Contribution à l'évaluation de la charge de travail du cheval trotteur à l'entraînement et en course. Thèse Medecine Vétérinaire, pp. 171.
47. Couroucé, A., 1999. Field exercise testing for assessing fitness in french Standardbred trotters. The Veterinary Journal 157, 112-122.
48. Couroucé, A., Chatard, J. and Auvinet, B., 1997. Estimation of performance potential of Standardbred trotters from blood lactate concentrations measured in field conditions. Equine Veterinary Journal 29, 365-369.
49. Couroucé, A., Chrétien, M. and Valette, J., 2002. Physiological variables measured under field conditions according to age and state of training in French Trotters. Equine Veterinary Journal 34, 91-97.
50. Couroucé, A., Geffroy, O., Barrey, E., Auvinet, B. and Rose, R., 1999. Comparison of exercise tests in Frenc trotters under training track, racetrack and treadmill conditions. Equine Veterinary Journal Supplement 30, 528-532.
51. Couroucé-Malblanc, A., Fortier, G., Pronost, S., Corde, R., Rossignol, F. and Deniau, V., 2008. Paramètres physiologiques et évaluation des voies respiratoires supérieures et profondes chez des chevaux trotteurs soumis à un exercice standardisé sur tapis roulant. Bulletin Académie Vétérinaire France 161, 351-358.
52. Coyle, E. and Gonzalez-Alonso, J., 2001. Cardiovascular drift during prolonged exercise: new perspectives. Exercise and Sport Sciences Reviews 29, 88-92.
53. Crandall, C., Taylor, S. and Raven, P., 1994. Evaluation of the Cosmed K2 portable telemetric oxygen uptake analyzer. Medicine and Science in Sports and Exercise 26, 108-111.
54. Crouter, S., Albright, C. and Bassett, J., 2004. Accuracy of Polar S410 heart rate monitor to estimate energy cost of exercise. Medicine and Science in Sports and Exercise 36, 1433-1439.
55. Cruz, A., Coté, N., McDonell, W., Geor, R., Wilson, B., Monteith, G. and Li, R., 2006. Postoperative effects of anesthesia and surgery on resting energy expenditure in horses as measured by indirect calorimetry. Canadian Journal of Veterinary Research 70, 257-262.

D

56. Dahl, S., 2005. Contribution à l'étude de la récupération active chez le trotteur français à l'entraînement. Thèse de doctorat Vétérinaire.
57. Dancer, S., 1968. Training and conditionning. In: Harrison, J.(ed) Care and training of the trotter and pacer. USTA, Colombus, Ohio, pp. 186.
58. Daniel, J., 1971. Portable respiratory gas collection equipment. Journal of Applied Physiology 31, 164-167.
59. Davie, A., Evans, D., Hodgson, D. and Rose, R., 1996. Effects of glycogen depletion on high intensity exercise performance and glycogen utilisation rates. Pferdehelkunde 12, 482-484.
60. Davie, A., Priddle, T. and Evans, D., 2002. Metabolic responses to submaximal field exercise tests and relationships with racing performance in pacing Standardbreds. Equine Veterinary Journal Supplement 34, 112-115.
61. Demonceau, T. and Auvinet, B., 1992. Test d'effort de terrain pour trotteurs à l'entraînement: réalisation pratique et premiers résultats. In: Compte rendu de la 18eme Journée d'Etude, CEREOPA, Paris, 120-32.
62. Demonceau, T., Guezennec, C. and Bigard, A.,1993. Typologie musculaire du cheval d'endurance - relations avec l'aptitude physique aérobie. Equathlon 5, 18-20.
63. Denoix, J.M., 1989. Guide de dissection des mammifères domestiques, dissection de la tête. Laboratoire d'anatomie de l'E.N.V.A, Maisons Alfort, France, pp.48.
64. Di Prampero, P., 1981. Energetics of muscular exercise. Reviews of physiology, biochemistry and pharmacology 89, 143-222.
65. Di Prampero, P., 1986. The energy cost of human locomotion on land and in water. International Journal of Sports Medicine 7, 55-72.
66. Di Prampero, P. and Ferretti, G., 1999. The energetics of anaerobic muscle metabolism: a reappraisal of older and recent concepts. Respiration Physiology 118, 103-115.
67. Dietary reference intakes for energy, carbohydrate, fiber, fat, fatty acids, cholesterol, protein, and amino acids, 2005. Institute of Medicine of the National Academies, The National Academies Press, Washington, DC, USA.
68. Douglas, C., 1911. A method for determining the total respiratory exchange in man. The Journal of Physiology 42, 17-18.
69. Drake, A., James, R., Cox, V., Godfrey, R. and Brooks, S., 2011. Physiological variables related to 20 km race walk performance. In: Pupis M. (ed) World race walking research, pp. 248.
70. DRI (Dietary References Intakes), 2001. Food and nutrition board. Institute of Medecine, National Academy Press, Washington, DC, USA.
71. Dubreucq, C., Chatard, J., Courouce, A. and Auvinet, B., 1995. Reproducibility of a standardised exercise test for Standardbred trotters under field conditions. Equine Veterinary Journal Supplement 18, 108-112.
73. Duffield, R., Dawson, B., Pinnington, H. and Wong, P., 2004. Accuracy and reliability of a Cosmed K4b2 portable gas analysis system. Journal of Science and Medicine in Sport 7, 11-22.
74. Dugdale, A., Curtis, G., Milne, E., Harris, P. and McArgo, C., 2011. Assessment of body fat in the pony: Part II. Validation of the deuterium oxide dilution technique for the measurement of body fat. Equine Veterinary Journal 43, 562-570.
75. Dupin, H., Abraham, J. and Giachetti, I., 1992. Apports nutritionnels conseillés pour la population française. Lavoisier (ed), Tec et Doc, Paris.

E

76. Eaton, M., 1994. Energetics and performance. In: Hodgson, D. and Rose, R. (eds) The athletic horse: Principles and Practice of Equine Sports Medicine. Saunders Company, Philadelphia, USA, 49-61.
77. Eaton, M., Evans, D., Hodgson, D. and Rose, R., 1995. Effects of treadmill incline and speed on metabolic rate during exercise in Thoroughbred horses. Journal of Applied Physiology 79, 951-957.
78. Eaton, M., Hodgson, D., Evans, D. and Rose, R., 1999. Effects of low- and moderate-intensity training on metabolic responses to exercise in Thoroughbreds. Equine Veterinary Journal Supplement 30, 521-527.
79. Eaton, M., Rose, R., Evans, D. and Hodgson, D., 1995. Assessement of anaerobic capacity using maximal accumulated oxygen deficit in fit Thoroughbred. Equine Veterinary Journal Supplement 18, 29-32.
80. Ekblom, B., 1986. Applied physiology of soccer. Sports Medicine 3, 50-60.
81. Erdogan, A., Cetin, C., Karatosun, H. and Lütfi Baydar, M., 2010. Accuracy of the Polar S810iTM heart rate monitor and the Sensewear Pro ArmbandTM to estimate energy expenditure of indoor rowing exercise in overweight and obese individuals. Journal of Sports Science and Medicine 9, 508-516.
82. Erickson, B., Erickson, H., Sexton, W. and Coffman, J., 1987. Performance evaluation and detection of injury during exercise training in the Quarter horse using a heart rate computer. In: Gillespie, J. and & Robinson, N. (eds) Equine Exercise Physiology 2. ICEEP publications, Davis, USA, 92-101.
83. Erickson, H. and Poole, D., 2004. Exercise physiology. In: Reece W. (ed) Dukes physiology of domestic animals 12th edition. Ithaca, Cornell University Press, pp. 360.
84. Essen, B. and Henriksson, J., 1974. Glycogen content of individual muscle fibers in man. Acta Physiologica Scandinavica 90, 645-647.
85. Essen-Gustavsson, B., Karlström, K. and Lindholm, A., 1984. Fiber types, enzyme activities and substrate utilisation in skeletal muscles of horses competing in endurance rides. Equine Veterinary Journal 16, 197-202.
86. Essén-Gustavsson, B., Ronéus, N. and Pösö, A., 1997. Metabolic response in skeletal muscle fibers of Standardbred trotters after racing. Comparative Biochemistry and Physiology B-Biochemistry and Molecular Biology 117, 431-436.
87. Evans, D., 2008. Exercise testing in the field. In: Hinchcliff, K., Geor, R. and Kaneps, A. (eds) Equine Exercise Physiology. Saunders, Philadelphia, USA, 12-27.
88. Evans, D. and Rose, R., 1988. Cardiovascular and respiratory responses in thoroughbred horses during treadmill exercise. Journal of Experimental Biology 134, 397-408.
89. Evans, D. and Rose, R., 1988. Cardiovascular and respiratory responses to submaximal exercise training in the Thoroughbred horse. Pfluegers Archiv - European Journal of Physiology 411, 316-321.

F

90. Faisy, C. and Taylor, S., 2009. Dépense énergétique en réanimation. Réanimation 18, 477-485.
91. Fargeas-Gluck, M. and Léger, L., 2012. Comparison of two aerobic field tests in young tennis players. Journal of Strength and Conditioning Research 26, 3036-3042.
92. Flatt, J., 1978. The biochemistry of energy expenditure. In: Bray, G. (ed) Recent advances in obesity research. Newman Publishing, Londres, UK, 211-228.
93. Folli, S., 1999. Nutrition appliquée à la performance sportive. Schweizerische Zeitschrift für «Sportmedizin und Sporttraumatologie» 47, 94-100.

94. Foreman, J., Bayly, W., Grant, B. and Gollnick, P.,1990. Standardized exercise test and daily heart rate responses of Thoroughbreds undergoing conventional race training and detraining. American Journal of Veterinary Research 51, 914-920.
95. Foster, K. and Lukaski, H., 1996. Whole body impedence - What does it measure? American Journal of Clinical Nutrition 64, 388S-396S.
96. Fox, S., Naughton, J. and Haskell, W., 1971. Physical activity and the prevention of coronary heart disease. Annals of Clinical Research 3, 404-432.
97. Freedson, P. and Miller, K., 2000. Objective monitoring of physical activity using motion sensors and heart rate. Research Quarterly for Exercise and Sport 71, S21-S29.
98. Fuller, Z., Maltin, C., Milne, E., Mollison, G., Cox, J. and McArgo, C., 2004. Comparison of calorimetry and doubly labelled water technique for the measurement of energy expenditure in Equidae. Animal Science 78, 293-303.

G

99. Gacon, G., 1993. Vers une nouvelle définition du travail maximal aérobie chez le coureur de demi-fond: un nouveau concept d'entraînement la pondération. Revue AEFA, 131.
100. Gacon, G., 1999. L'intermittent court-court "mode scandinave". www.propulse.com.
101. Gaesser, G. and Poole. D.C., 1996. The slow component of oxygen uptake kinectics in humans. Exercise and Sport Sciences Reviews 24, 35-70.
102. Galgani, J. and Ravussin, R., 2008. Energy metabolism, fuel selection and body weight regulation. International Journal of Obesity 32, S109-S119.
103. Gaskill, S., Ruby, B., Walker, A., Sanchez, O., Serfass, R. and Leon, A., 2001. Validity and reliability of combining three methods to determine ventilatory threshold. Medicine and Science in Sports and Exercise 33, 1841-1848.
104. Gastinger, S., 2010. Mesure ambulatoire des mouvements thoraciques et abdominaux: développement d'un prototype pour l'estimation de la dépense énergétique. Thèse de Doctorat, pp. 201.
105. Gauvreau, G., Staempfli, H., McCutcheon, L., Young, S. and McDonell, W., 1995. Comparison of aerobic capacity between racing Standardbred horses. Journal of Applied Physiology 78, 1447-1451.
106. GEH (Gesellschaft Für Ernährungsphysiologie), 1994. Empfehlungen zur Energie und Nährstoffversorgung der Pferde. DLG-Verlag Frankfut/Main, ISBN 3-7690-0517-1.
107. Geor, R., 2001. New methods for assessing substrates utilization in horses during exercise. In: Advances in equine nutrition - 2nd Equine nutrition conference for feed manufacturers, 73-86.
108. Geor, R., 2008. Nutritionnal management of the equine athlete. In: Hinchcliff, K.W., Geor, R.J. and Kaneps, A. (eds) Equine Exercise Physiology. The Science of Exercise in the Athletic Horse. Saunders Elsevier, New York, USA, 301-325.
109. Geor, R., 2011. Nutrient replenishment strategies for athletic horses during exercise recovery - a focus on muscle glycogen. In: Proceedings of the 5th European Nutrition & Health Congress (EENHC). Warengem, Belgium, 68-77.
110. Gerbeaux, M., Lensel-Corbeil, G., Branly, G., Dierkens, J., Jacquet, A., Jacquet, A., Lefranc, J.F., Savin, A. and Savin, N., 1991. Estimation de la vitesse maximale aérobie chez les élèves des collèges et lycées. Science et Motricité 13, 19-26.
111. Goachet, A., Fortier, J., Julliand, V., Assadi, H. and Lepers, R., 2011. The use of equine K4b² during incremental field exercise tests in driven Standardbred trotters: a preliminary study. In; Lindner, A. (ed) Proceedings of the Equine Nutrition and Training Conference, 221-226.
112. Gottlieb, M., 1989. Muscle glycogen depletion patterns during draught work in Standardbred horses. Equine Veterinary Journal 21, 110-115.

113. Gottlieb-Vedi, M. and Lindholm, A., 1997. Comparison of standardbred trotters exercising on a treadmill and a race track with identical draught resistances. Veterinary Record 140, 525-528.
114. Gottlieb-Vedi, M., Essen-Gustavsonn, B. and Persson, S., 1991. Draught load and speed compared by submaximal tests on a treadmill. In: Persson, S., Lindholm, A. and Jeffcott, L. (eds) Proceedings of the3rd International Conference of Equine Exercise Physiology (ICEEP). Davis, USA, 92-96.
115. Grover, R., Weil, J. and Reeves, J., 1986. Cardiovascular adaptations to exercise at high altitude. Exercise and Sport Sciences Reviews 14, 269-302.
116. Guezennec, C., 1995. Oxidation rates, complex carbohydrates and exercise. Sports Medicine 95, 365-372.
117. Guezennec, C., Portero, P., Satabin, P. and Seyfried, D., 1988. La nutrition glucidique avant et pendant l'exercice physique. Science et motricité 5, 39-45.

H

118. Hagberg, J. and Coyle, E., 1984. Physiological comparison of competitive racewalking and running. International Journal of Sports Medicine 5, 74-77.
119. Hanak, J., Jahn, P., Kabes, R., Sedlinska, M., Zert, Z., Mezerva, J. and Chvatal, O., 2001. A field study of oxygen consumption and estimated energy expenditure in the exercising horse. Acta Veterinaria Brno 70, 133-139.
120. Hargreaves, B., Kronfeld, D. and Naylor, J., 1999. Ambient temperature and relative humidity influenced packed cell volume, total plasma protein and other variables in horses during an incremental submaximal field exercise test. Equine Veterinary Journal 31, 314-318.
121. Harris, D., Harris, R., Wilson, A. and Goodship, A., 1997. ATP loss with exercise in muscle fibers of the gluteus medius of the thoroughbred horse. Research in Veterinary Science 63, 231-237.
122. Harris, J. and Benedict, F., 1919. A biometric study of basal metabolism in man. Carnegie Institute of Washington, Washington, DC, USA.
123. Haun, M., 1997. The X factor. How it is and how to find it: the relationship between heart size and racing performance. The Russell Meerdink Company Ltd, Neenah, WI, USA.
124. Hausswirth, C., Bigard, A. and Le chevalier, J., 1997. The Cosmed K4 telemetry system as an accurate device for oxygen uptake measurements during exercise. International Journal of Sports Medicine 18, 449-453.
125. Hebestreit, H., Meyer, F., Htay-Htay, G. and Bar-Or, O., 1996. Plasma metabolites, volume and electrolytes following 30-s high-intensity exercise in boys and men. European Journal of Applied Physiology 72, 563-569.
126. Hermansen, L. and Stensvold, I., 1972. Production and removal of lactate during exercise in man. Acta Physiologica Scandinavica 86, 191-201.
127. Heymsfield, S., Harp, J., Rowell, P., Nguyen, A. and Pietrobelli, A., 2006. How much may I eat? Calorie estimates based upon energy expenditure prediction equations. Obesity Reviews 7, 361-370.
128. Hinchcliff, K. and Geor, R., 2008. The horse as an athlete: a physiological overview. In: Hinchcliff, K.W., Geor, R.J. and Kaneps, A. (eds) Equine Exercise Physiology. The Science of Exercise in the Athletic Horse. Saunders Elsevier, New York, USA, 2-11.
129. Hodgdon, J., Friedl, K., Beckett, M., Westphal, K. and Shippee, R., 1996. Use of bioelectrical impedence analysis measurements as predictors of physical performance. American Journal of Clinical Nutrition 64, 463S-468S.
130. Hodgston, D., Davis, R. and McConaghy, F., 1994. Thermoregulation in the horse in response to exercise. British Veterinary Journal 150, 219-235.

131. Hörnicke, H., Ehrlein, H., Tolkmitt, G. and Meixner, G., 1984. Problems and results of respiratory telemetry in exercising horses. In: Sansen, W. (ed) Biotelemetry IV. Leuven, Belgium 120-124.
132. Husson, F., Joss, J., Le, S. and Mazet, J., 2008. Factor analysis and data mining with R. R package version 1.10. http://factominer.free.fr; http://www.agrocampus-rennes.fr/math/.
133. Hyyppä, S., Räsänen, L. and Pösö, A., 1997. Resynthesis of glycogen in skeletal muscle from Standardbred trotters after repeated bouts of exercise. American Journal of Veterinary Research 58, 162-166.
134. Iaiche, R., Toraa, M. and Friemel, F., 1996. Evaluation de VO2max et de VMA en laboratoire et sur le terrain. Science et Sports 11, 91-95.
135. INRA, 1984. Le cheval. Reproduction Sélection Alimentation Exploitation. In: Jarrige, R. and Martin-Rosset, M. (eds) INRA, Paris, France.
136. INRA, 1990. L'alimentation des chevaux. In: Martin-Rosset, M. (ed) INRA, PAris, France.
137. INRA-HN-IE, 1997. Notation de l'état corporel des chevaux de selle et de sport. Guide pratique. Institut de l'Elevage, Paris, France.
138. Jacob, I., 1981. Lactate, muscle glycogen and exercise performance in man. Acta Physiologica Scandinavica 495, 1-35.
139. Jacobs, I., Westlin, N., Karlsson, J., Rasmusson, M. and Houghton, B., 1982. Muscle glycogen and diet in elite soccer players. European Journal of Applied Physiology 48, 297-302.
140. Jequier, E. and Felber, J., 1987. Indirect calorimetry. Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism 1, 911-935.
141. Juel, C., Bangsbo, J., Graham, T. and Saltin, B., 1990. Lactate and potassium fluxes from human skeletal muscle during and after intense, dynamic, knee extensor exercise. Acta Physiologica Scandinavica 140, 147-159.

K

142. Karlsson, J., 1971. Lactate and phosphagen concentrations in working muscle of man. Acta Physiologica Scandinavica Supplement 358, 1-72.
143. Katz, A. and Sahlin, K., 1988. Regulation of lactic production during exercise. Journal of Appiedl Physiology 65, 509-518.
144. Katz, L., Bayly, W., Hines, M. and Sides, R., 1999. Differences in the ventilatory responses of horses and ponies to exercise of varying intensities. Equine Veterinary Journal Supplement 30, 49-51.
145. Kawakami, Y., Nozaki, D., Matsuo, A. and Fukunaga, T., 1992. Reliability of measurement of oxygen uptake by a portable telemetric system. European Journal of Applied Physiological and Occupationnal Physiology 65, 409-414.
146. Kearns, C., McKeever, K. and Abe, T., 2002. Overview of horse body composition and muscle architecture: implications for performance. Veterinary Journal 164, 224-234.
147. Kim, J., Hinchcliff, K., Yamaguchi, M., Beard, L., Market, C. and Devor, S., 2005. Exercise training increases oxidative capacity and attenuates exercise-induced ultrastructural damage in skeletal muscle of aged horses. Journal of Applied Physiology 98, 334-342.
148. King, C., Evans, D. and Rose, R., 1994. Cardiorespiratory and metabolic responses to exercise in horses with various abnormalities of the upper respiratory tract. Equine Veterinary Journal 26, 220-225.
149. Knight, P., Sinha, A. and Rose, R., 1991. Effects of training intensity on maximum oxygen uptake. Equine Exercise Physiology 3, 77-82.

150. Kobayashi, M., Kuribara, K. annd Amada, A.,1999. Application of V200 values for evaluation of training effects in the young Thoroughbred under field conditions. Equine Veterinary Journal Supplement 30, 159-162.
151. Kohn, C., Hinchcliff, K. and McKeever, K., 1999. Effect of ambiant temperature and humidity on pulmonary artery temperature of exercising horses. Equine Veterinary Journal Supplement 30, 404-411.
152. Kossila, V., Virtanen, R. and Maukonen, J., 1972. A diet of hay and oat as a source of energy digestible crude protein, minerals and trace elements for saddle horses. The Scientific Agricultural Society of Finland 44, 217-227.

L

153. Lacombe, V., Hinchcliff, K., Geor, R. and Baskin, C., 2001. Muscle glycogen depletion and subsequent replenishment affect anaerobic capacity of horses. Journal of Applied Physiology 91, 1782-1790.
154. Lacombe, V., Hinchcliff, K., Geor, R. and Lauderdale, M., 1999. Exercise taht induces substantial muscle glycogen depletion impairs subsequent anaerobic capacity. Equine Veterinary Journal Supplement 30, 293-297.
155. Landgren, G., Gillespie, J., Fedde, M., Jones, B., Pieschl, R. and Wagner, P., 1988. O2 transport in the horse during rest and exercise. Advances in Experimental Medicine and Biology 227, 333-336.
156. Lauriers, A., 2010. Etude de la dépense énergétique chez le cheval d'endurance. Mémoire de fin d'études, Université de Gembloux, Belgique, pp. 69.
157. Laville, M., 2006. Composante de la dépense énergétique. In: I. Servier I. (ed) L'obésité: un problème d'actualité, une question d'avenir. Elsevier Masson, Paris, France, pp. 272.
158. Lawrence, L., 2009. Assessing energy balance. Advances in equine nutrition 4, 43-50.
159. Lee, R., Wand, Z., Heo, M., Ross, R., Janssen, I. and Heymsfield, S., 2000. Total body skeletal muscle mass: development and cross-validation of anthropometric prediction models. American Journal of Clinical Nutrition 72, 378-383.
160. Léger, L. and Boucher, R., 1980. An indirect continuous running multistage field test, the Université de Montréal Track Test. Canadian Journal of Applied Sport Sciences 5, 77-84.
161. Lèger, L., Mercier, D., Gadoury, C. and Lambert, J., 1988. The multistage 20 meter shuttle run test for aerobic fitness. Journal of Sports Sciences 6, 93-101.
162. Lekeux, P. and Art, T., 2009. Le système respiratoire du cheval : relation structure-fonction-pathologie. 11th Congress on Equine Medicine and Survery. Geneve, Suisse.
163. Leprête, P., Metayer, N., Giovagnoli, G., Pagliei, E. andBarrey, E., 2009. Comparison of analyses of respiratory gases made with the K4b² portable and Quark laboratory analysers in horses. Veterinary Record 165, 22-25.
164. Levine, J., 2005. Measurement of energy expenditure. Public Health Nutrition 8, 1123-1132.
165. Li, R., Deurenberg, P. and Hautvast, J., 1993. A critical evaluation of heart rate monitoring to assess energy expenditure in individuals. American Journal of Clinical Nutrition 58, 602-607.
166. Lifson, N., Gordon, G. and McClintock, R., 1955. Measurement of total carbon dioxide production by means of D2O18. Journal of Applied Physiology 7, 704-710.
167. Lindhom, A. and Saltin, B., 1974. The physiological and biomechanical response of Standarbred horses to exercise of varying speed and duration. Acta Veterinaria Scandinavica 15, 310-324.
168. Lindner, A., 2010. Relationship between racing times of Standardbreds and v4 and v200. Journal of Animal Science 88, 950-954.
169. Livingstone, M., Prentice, A., Coward, W., Ceesay, S., Strain, J., McKenna, P., Nevin, G.B., Barker, M.E. and Hickey, R.J., 1990. Simultaneous measurements of free-living energy

expenditure by the doubly labeled water method and heart-rate monitoring. American Journal of Clinical Nutrition 52, 59-65.

170. Lovell, D., 1994. Training Standardbred Trotters and Pacers. In: Hodgson, D. and Rose R. (eds) The athletic horse. WB Saunders Company, Philadelphia, USA, 399-408.
171. Lucia, A., Fleck, S., Gotshall, R. and Kearney, J., 1993. Validity and reliability of the Cosmed K2 instrument. International Journal of Sports and Medicine 14, 380-386.

M

172. Maehlum, S., Grandmontagne, M., Newsholme, E. and Sejersted, O., 1986. Magnitude and duration of excess postexercise oxygen consumption in healthy young subjects. Metabolism 35, 425-429.
173. Manohar, M., Goetz, T. and Hassan, A., 2001. Effect of prior high-intensity exercise-induced arterial hypoxemia in Thoroughbred horses. Journal of Applied Physiology 90, 2371-2377.
174. Margaria, R., 1976. Biomechanics and energetics of muscular exercise. Clarendon Press Oxford, UK, pp.146.
175. Margaria, R., Edwards, H. and Dill, D., 1933. The possible mechanism of contracting and paying the oxygen debt and the role of lactic acid in muscular contraction. American Journal of Physiology 106, 689-714.
176. Marlin, D. and Nankervis, K., 2002. Equine exercise physiology. Blackwell Science, Oxford, UK, pp. 304.
177. Marlin, D., Scott, C., Schroter, R., Harris, R., Roberts, C. and Mills, P., 1999. Physiological responses of horses to a treadmill simulated speed and endurance test in high heat and humidity before and afterhumid heat acclimation. Equine Veterinary Journal 31, 31-42.
178. Martin, A., 2001. Apports nutritionnels conseillés pour la population française 3eme edition. Tec et Doc, Paris, France.
179. Martin-Rosset, W., 2012. Nutrition et alimentation des chevaux. Editions Quae, Versailles, France.
180. Martin-Rosset, W., Andrieu, J., Vermorel, M. and Dulphy, J., 1984. Valeurs nutritives des aliments pour le cheval. In: Jarrige, R. and Martin-Rosset, W. (eds) Le cheval. INRA Editions, Paris, France, 209-238.
181. Matsui, A., Katsuki, R., Fujikawa, H., Kai, M., Kubo, K., Hiraga, A. and Asai, Y., 2004. Effects of uphill exercise on digestible energy intake and energy expenditure during exercise in yearling horses. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences 17, 973-979.
182. McArdle, W.D., Katch, F. and Katch, V.L., 1991. Exercise Physiologie: Energy, Nutrition, and Human Performance 3th edition. Lea and Febiger, Philadelphia, USA.
183. McCutcheon, L. and Geor, R., 2000. Influence of training on sweating responses during submaximal exercise in horses. Journal of Applied Physiology 89, 2463-2471.
184. McCutcheon, L., Geor, R. and Hinchcliff, K., 1999. Effects of prior exercise on muscle metabolism during sprint exercise in horses. ournal of Applied Physiology 87, 1914-1922.
185. McDonough, P., Kindig, C.A., Erickson, H.H. and Poole, D.C., 2002. Mechanistic basis for the gas exchange threshold in Thoroughbred horses. Journal of Applied Physiology 92, 1499-1505.
186. McDonough, P., Kindig, C., Hildreth, T., Behnke, B., Erickson, H. and Poole, D., 2002. Effect of body incline on cardiac performance. Equine Veterinary Journal Supplement 34, 506-509.
187. McKeever, K.H., Eaton, T.L., Geiser, S., Kearns, C.F. and Lehnhard, R.A., 2010. Age related decreases in thermoregulation and cardiovascular function in horses. Equine Veteterinary Journal Supplement 42, 220-227.

188. McKeever, K., Hinchcliff, K., Reed, S. and Robertson, J., 1993. Role of decreased plasma volume in hematocrit alterations during incremental treadmill exercise in horses. American journal of Physiolgy 265, R404-R408.
189. McLaughlin, J., King, G., Howley, E., Bassett, D. and Ainsworth, B., 2001. Validation of the Cosmed K4 b² portable metabolic system. International Journal of Sports Medicine 22, 280-284.
199. McMicken, D., 1983. An energetic basis of equine performance. Equine Veterinary Journal 15, 123-133.
200. Medbo J.I., Mohn A.C., Tabata I., Bahr R., Vaage O. and Sejersted M., 1988. Anaerobic capacity determined by maximal accumulated O2 deficit. Journal of Applied Physiology 64, 50-60.
201. Mello, F., Bertuzzi, R., Grangeiron, P. and Franchini, E., 2009. Energy systems contributions in 2000 m race simulation: a comparison among rowing ergometers and water. European Journal of Applied Physiology 107, 615-619.
202. Menier, D. and Pugh, L., 1968. The relation of oxygen intake and velocity of walking and running in competition walkers. Journal of Physiology 197, 717-721.
203. Midwood, A., 1990. Application of the doubly labelled water method for measuring CO2 production to sheep. Thèse de Doctorat, University of Aberdeen, UK.
204. Minetti, A., Ardigo, L., Reinach, E. and Saibene, F., 1999. The relationship between mechanical work and energy expenditure of locomotion in horses. The Journal of Experimental Biology 202, 2329-2338.
205. Monod, H. and Flandrois, R., 1994. Physiologie du sport. Bases physiologiques des activités physiques et sportives 3ème édition. Elsevier Masson, Paris, France.
206. Montoye, H., Kemper, H., Washburn, R. and Saris, W., 1996. Measuring physical activity and energy expenditure. Human Kinectics, Canada, pp. 191.
207. Morris, E. and Seehermann, H., 1991. Clinical evaluation of pooor performnace in the racehorse: the result of 275 evaluations. Equine Veterinary Journal 23, 169-174.
208. Mos, J., 2006. Pratiques alimentaires au sein des écuries de trotteurs de course en France et apports nutritionnels pour le trotteur de 3 ans à l'entraînement. Mémoire ingénieur, ENESAD, Dijon, France.

N

209. Nadal'jak, E., 1961. Gaseous exchange and energy expenditure at rest and during different tasks by breeding stallions of heavy draught breeds. Nutrition Abstracts and Reviews 32, 463-464.
210. Neilson, H., Robson, P., Friedenreich, C. and Csizmadi, I., 2008. Estimating activity energy expenditure: how valid are physical activity questionnaire? American Journal of Clinical Nutrition 87, 279-291.
211. Nelson, K., Weinsier, R., Long, C. and Schutz, Y., 1992. Prediction of resting energy expenditure from fat-free mass and fat mass. American Journal of Clinical Nutrition 56, 848-856.
212. Nery, L., Wasserman, K., Andrews, J., Huntsman, D., Hansen, J. and Whipp, B., 1982. Ventilatory and gas exchange kinetics during exercise in chronic airways obstruction. Journal of Applied Physiology 53, 1594-1602.
213. NRC (National Research Council), 1981. Effect of the environment on nutrient requirements of domestic animals. National Academy Press, Washington, DC, USA.
214. NRC (National Research Council), 2007. Nutrient requirements of horses. National Academy Press, Washington, DC, USA.
215. Nummela, A., Keränen, T. and Mikkelsson, L., 2007. Factors related to top running speed and economy. International Journal of Sports Medicine 28, 655-661.

216. Nunn, J., 1993. Nunn's Applied Respiratory Physiology 4th edition. Butterworth-Heinemann, Oxford, UK.
217. Nyman, G., Bjork, M., Funkquist, P., Persson, S. and Wagner, P., 1995. Ventilation-perfusion relationships during graded exercise in the Standardbred trotter. Equine Veterinary Journal Supplement 18, 63-69.

O

218. Owen, O., 1988. Resting metabolic requirements of men and women. Mayo Clinic Proceedings 65, 503-510.

P

219. Padilla, D., McDnough, P., Kindig, C., Erickson, H. and Poole, D., 2004. Ventilatory dynamics and control of blood gases after maximal exercise in the Thoroughbred horse. Journal of Applied Physiology 96, 2187-2193.
220. Pagan, J. and Hintz, H., 1986. Equine Energetics II. Energy expenditure in horses during submaximal exercise. Journal of Animal Sciences 63, 822-830.
221. Parkin, J., Carey, M., Zhao, S. and Febbraio, M., 1999. Effect of ambient temperature on human skeletal muscle metabolism during fatiguing submaximal exercise. Journal of Applied Physiology 86, 902-908.
222. Pate, R. and Branch, J. 1992. Training for endurance sport. Medecine and Science in Sports and Exercise 24, 340.
223. Persson, S., 1983. Evaluation of exercise tolerance and fitness in the performance horse. In: D.H. Snow, D.H., Persson S.G.B. and Rose R.J. (eds) Equine Exercise Physiology. Granta publications, Cambridge, UK, 441-457.
224. Poole, D. and Erickson, H., 2008. Cardiovascular function and oxygen transport: responses to exercise and training. In: Hinchcliff, K.W., Geor, R.J. and Kaneps, A. (eds) Equine Exercise Physiology. The Science of Exercise in the Athletic Horse. Saunders Elsevier, New York, USA, 212-245.
225. Poortmans, J.R., 1988. Aspects quantitatif de la dépense énergétique. In: Rieu, M. (ed) Bioénergétique de l'exercice musculaire. Presses Universitaires de France, Paris, France, 141-145.
226. Poortmans, J. and Boisseau, N., 2012. Biochimie des activités physiques et sportives 2nd édition. De Boeck, Bruxelles, Belgique.
227. Pösö, A., Hyyppä, S. and Geor, R., 2008. Metabolic responses to exercise and training. In: Hinchcliff, K.W., Geor, R.J. and Kaneps, A. (eds) Equine Exercise Physiology. The Science of Exercise in the Athletic Horse. Saunders Elsevier, New York, USA, 248-273.
228. Pösö, A., Lampinen, K. and Räsänen, L., 1995. Distribution of lactate between red blood cells and plasma after exercise. Equine Veterinary Journal Supplement 18, 231-234.
229. Potier de Courcy, F. M., Fricker, J., Martin, A. and Dupin, H., 2003. Besoins nutritionnels et apports conseillés pour la satisfaction de ces besoins. In: Editions Scientifiques et Médicales (ed), Encyclopédie Médico-Chirurgicale, Paris, France.
230. Pradet, M., 1989. Les qualités physiques et leur entraînement méthodique. In: Brousse, M., During, B., Le Chevalier, J. and Pradet, M. (eds) Energie et conduite motrice. Publications INSEP, Paris, France.

R

231. Rietjens, G., Kuipers, H., Kester, A. and Keizer, H., 2001. Validation of a computerized metabolic measurement system (Oxycon-Pro) during low and high intensity exercise. International Journal of Sports Medicine 22, 291-294.
232. Robergs, R. and Landwehr, R., 2002. The surprising history of the "HRmax=220-age" equation. Official Journal of The American Society of Exercise Physiologists (ASEP), An International Electronic Journal 5, 1-10.
233. Roneus, N., Essen-Gustavsson, B., Lindholm, A. and Ericksson, Y., 1994. Plasma lactate response to submaximal and maximal exercise tests with training, and its relationship to performance and muscle characteristics in Standardbred trotters. Equine Veterinary Journal 26, 117-121.
234. Ronéus, N., Essén-Gustavsson, B., Lindholm, A. and Persson, S., 1999. Muscle characteristics and plasma lactate and ammonia response after racing in Standardbred trotters: relation to performance. Equine Veterinary Journal 31, 170-173.
235. Rose, R., Hodgson, D., Kelso, T., McCutcheon, L., Reid, T., Bayly, W.M., Gollnick, P.D., 1988. Maximum O2 uptake, O2 debt and deficit, and muscle metabolites in Thoroughbred horses. Journal of Applied Physiology 64, 781-788.

S

236. Saltin, B. and Astrand, P., 1967. Maximal oxygen uptake in athletes. Journal of Applied Physiology 23, 353-358.
237. Scheffer, C., Robben, J. and Sloet van Oldruitenborgh-Oosterbaan, M., 1995. Continuous monitoring of ECG in horses at rest and during exercise. Veterinary Record 137, 371-374.
238. Schoeller, D., 1999. Recent advances from application of doubly labeled water to measurement of human energy expenditure. Journal of Nutrition 129, 1765-1768.
239. Schoeller, D. and Van Santen, E., 1982. Measurement of energy expenditure in humans by boudly labeled water method. Journal of Applied Physiology 53, 955-959.
240. Schoeller, D., Ravussin, E., Schutz, Y., Acheson, K., Baertschi, P. and Jéquier, E., 1986. Energy expenditure by doubly labeled water: validation in humans and proposed calculation. American Journal of Physiology 250, R823-830.
241. Schott, H., 2010. Challenges of endurance exercise: hydration and electrolyte depletion. Proceedings of the 17th Feeding and veterinary management of the sport horse- Kentucky Equine Research Nutrition Conference, Lexington, KY USA, 94-111.
242. Schultz, S., Westerterp, K. and Bruck, K., 1989. Comparison of energy expenditure by the doubly labeled water technique with energy intake, heart rate, and activity recording in man. American Journal of Clinical Nutrition 49, 1146-1154.
243. Seaman, J., Erickson, B., Kubo, K., Hiraga, A., Kai, M., Yamaya, Y. and Wagner, P.D., 1995. Exercise induced ventilation/perfusion inequality in the horse. Equine Veterinary Journal 27, 104-109.
244. Seeherman, H. and Morris, E., 1990. Application of a standardised treadmill exercise test for clinical evaluation of fitness in 10 Thoroughbred racehorses. Equine Veterinary Journal 22, 26-34.
245. Seeherman, H. and Morris, E., 1991. Comparison of yearling, two-year-old and adult Thoroughbreds using a standardised exercise test. Equine Veterinary Journal 23, 175-184.
246. Sjödin, A., Forslund, A., Westerterp, K., Andersson, A., Forslund, J. and Hambraeus, L., 1996. The influence of physical activity on BMR. Medicine and Science in Sports and Exercise 28, 85-91.

247. Sloet van Oldruitenborgh-Osterbaan, M. and Barneveld, A., 1995. Comparison of the workload of Dutch warmblood horses ridden normally and on a treadmill. Veterinary Record 137, 136-139.
248. Solberg, G., Robstad, B., Skjonsberg, O. and Borchsenius, F., 2005. Respiratory gas exchange indices for estimating the anaerobic threshold. Journal of Sports Science and Medicine 4, 29-36.
249. Spurr, G., Prentice, A. and Murgatroyd, P., 1988. Energy expenditure from minute-by-minute heart rate recording: comparison with indirect calorimetry. American Journal of Clinical Nutrition 48, 552-559.
250. Steingart, R., Wexler, J., Slage, S. and Scheuer, J., 1984. Radionuclide ventriculagraphic responses to graded supine and upright exercise: Critical role of the Frank-Starling mechanism at submaximal exercise. American Journal of Cardiology 53, 1671-1677.
251. Sullivan, M., Cobb, F. and Higginbotharn, M., 1991. Stroke volume increase by similar mechanisms during upright exercise in normal men and women. American Journal of Cardiology 67, 1405-1412.
252. Sun, M. and Hill, J., 1993. A method for measuring mechanical work and work efficiency during human activities. Journal of Biomechanics 26, 229-241.

T

253. Tanaka, H., Monahan, K. and Seals, D., 2001. Age-predicted maximal heart rate revisited. Journal of the American College of Cardiology 37, 153-156.
254. Tappy, L. and Guenat, E., 2000. Dépense d'énergie, composition corporelle et activité physique chez l'homme. Médecine/sciences 16, 1063-1068.
255. Thomas, D. and Fregin, G., 1981. Cardiorespiratory and metabolic responses to treadmill exercise in the horse. Journal of Applied Physiology 50, 864-868.
256. Totora, G. and Grabowski, S., 2002. Principles of anatomy and physiology 10th edition. John Wiley and Sons, Canada.
257. Tyler, C., Golland, L., Evans, D., Hodgson, D. and Rose, R., 1996. Changes in maximum oxygen uptake during prolonged training, overtraining, and detraining in horses. Journal of Applied Physiology 81, 2244-2249.

V

258. Valle, E., Odore, R., Zanatta, P., Badino, P., Girardi, C., Nery, J., Assenza, A., Bergero, D., 2013. Estimation of the workload in horses during an eventing competition. Comparative Exercise Physiology 9, 93-101.
259. Van Erck, E., Votion, V., Serteyn, D.M., Art, T., 2007. Evaluation of oxygen consumption during fiel exercise tests in Standardbred trotters. Equine and Comparative Exercise Physiology 4, 43-49.
260. Vermorel, M., Jarrige, R. and Martin-Rosset, W., 1984. Métabolisme et besoins énergétiques du cheval. Le système des UFC. In: Jarrige, R. and Martin-Rosset, W. (eds) Le cheval. Reproduction Séléction Alimentation Exploitation. INRA, Paris, France.
261. Vermorel, M., Ritz, P., Tappy, L. and Laville, M., 2001. Energie. In: Martin, A. (ed) Apports nutritionnels conseillés 3ème édition. Tec et Doc, Paris, France, 17-36.
262. Verschuren, O., Maltais, E. and Takken, T., 2011. The 220-age equation does not predict maximum heart rate in children and adolescents. Developmental Medicine and Child Neurology 53, 861-864.
263. Von Borell, E., Langbein, J., Després, G., Hansen, S., Leterrier, C., Marchant-Forde, J., Marchat-Forde, R., Minero, M., Mohr, E., Prunier, A., Valance, D. and Veissier, I., 2007. Heart rate

variability as a measure of autonomic regulation of cardiac activity for assessing stress and welfare in farms animals - a review. Physiology and Behavior 92, 293-316.

264. Votion, D., Caudron, I., Lejeune, J., Van Der Heyden, L., Art, T., Van Erck, E. and Serteyn, D., 2006. New perspective for field measurement of cardiorespiratory parameters in exercising horses. Pferdeheikunde 5, 619-624.

W

265. Wasserman, K., Whipp, B., Koyal, S. and Beaver, W., 1973. Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. Journal of Applied Physiology 35, 236-243.
266. Wegener, J., Lindner, A. and Hartmann, U., 2012. Survey on the training of Standardbred racehorses by a successfull trainer. Pferdeheilkunde 28, 268-280.
267. Weinsier, R., Shutz, Y. and Bracco, D., 1992. Reexamination of the relationship of resting metabolic ratio rate to fat-free mass and to the metabolically active components of fat-free mass in humans. American Journal of Clinical Nutrition 55, 790-794.
268. Westerlind, K., Byrnes, W. and Mazzea, R., 1992. A comparison of the oxygen drift in downhill vs. level running. Journal of Applied Physiology 72, 796-800.
269. Whaley, M., Kaminsky, L., Dwyer, G., Getchell, L. and Norton, J., 1992. Predictors of over- and underachievement of age-predicted maximal heart rate. Medecine and Science in Sports and Exercise 24, 1173-1179.
270. Whipp, B. and Sargeant, A., 1999. Physiological determinants of exercise tolerance in humans, Studies in Physiology four. Portland Press, London, UK.
271. Wilmore, J., Costill, D. and Kenney, W., 2009. Physiologie du sport et de l'exercice 4ème édition. De Boeck, Bruxelles, Belgique.
272. Wilmore, J., Davis, J. and Norton, A., 1976. An automated system for assessing metabolic and respiratory function during exercise. Journal of Applied Physiology 40, 619-624.
273. Wilson, R., Isler, R. and Thornton, J., 1983. Heart rate, lactic acid production and spped during a standdardised exercise test in Standardbred horses. In: Snow, D., Persson, S. and Rose, R. (eds) Equine exercise physiology. Granta, Cambridge, UK, 487-496.

Y

274. Yamamoto, Y., Hughson, R. and Peterson, J., 1991. Autonomic control of heart rate during exercise studied by heart rate variability spectral analysis. Journal of Applied Physiology 71, 1136-1142.
275. Yoon, B., Kravitz, L. and Robergs, R., 2007. VO2max, Protocol Duration, and the VO2 Plateau. Medicine and Science in Sports and Exercise 39, 1186-1192.

Z

276. Zhang, Y., Johnson, M., Chow, N. and Wasserman, K., 1991. Effects of exercise testing protocol on parameters of aerobic function. Medicine and Science in Sports and Exercise 23, 625-630.
277. Zhou, B., Conlee, R., Jensen, R., Fellingham, G., George, J. and Fisher, A., 2001. Stroke volume does not plateau during graded exercise in elite male distance runners. Medecine and Science in Sports and Exercise 33, 1849-1854.

ANNEXES

Annexe 1. Questionnaire sur les pratiques d'entraînement réalisé au Centre d'entraînement de Grosbois.

N° : _____

Enquête sur les pratiques d'alimentation et d'entraînement du cheval trotteur

Les données relevées au cours de cet entretien seront strictement anomynes et serviront uniquement à la recherche et à la vulgarisation de la recherche.
Souhaitez-vous garder l'anonymat? OUI NON
Acceptez-vous que cet entretien soit enregistré? OUI NON
Souhaitez-vous recevoir un compte rendu de l'étude? OUI NON
(Entourer la bonne réponse)
Coordonnées mail:
Signature:

1. ECURIE

1. Vous êtes:
○ 1.entraîneur privé ○ 2.entraîneur public

2. Etes-vous:
○ 1.salarié ○ 2.à votre compte

3. Age de l'entraîneur

4. Depuis combien de temps entraînez-vous des trotteurs en tant que professionnel?

5. Département où se situe votre écurie (hors Grosbois)?

6. A votre écurie habituelle, vous courez
○ 1.en province ○ 2.en région parisienne
○ 3.les deux

7. Depuis combien d'année venez-vous sur le site de Grosbois?

8. Combien de temps par an restez-vous sur le site de Grosbois?

Nombre de chevaux entraînés en 2011
9. Nombre de débourrage
10. De 2 ans (V)
11. De 3 ans (U)
12. De 4 ans (T)
13. De 5 ans et + (S et +)

Prévisions 2012
14. Nombre de débourrage
15. De 2 ans
16. De 3 ans
17. De 4 ans
18. De 5 ans et +

19. Tous les chevaux ont-ils été emmenés sur le site de Grosbois?
○ 1.oui ○ 2.non

N° : _____

Enquête sur les pratiques d'alimentation et d'entraînement du cheval trotteur

20. Si non, combien?

La question n'est pertinente que si Chevaux grosbois = "non"

21. Pour quelles raisons venez-vous à Grosbois?

22. Pouvez-vous dresser une liste des pathologies que vous avez rencontré depuis 3 ans?

N° : _____

Enquête sur les pratiques d'alimentation et d'entraînement du cheval trotteur

4. LES PRATIQUES D'ENTRAINEMENT

172. Le plus souvent, vous qualifiez à...

○ 1.2 ans ○ 2.3 ans
○ 3.>3ans

173. Est ce plutôt en...

○ 1.en début d'année ○ 2.milieu
○ 3.fin d'année

174. Y a t-il une ou plusieurs périodes creuses volontaires dans l'année sans entraînement?

○ 1.oui ○ 2.non

175. Si oui, préciser pour qui, quand et combien de temps?

La question n'est pertinente que si Période sans entrainement = "oui"

176. En moyenne combien de fois par semaine un cheval sort-il?

177. Quelle est la durée moyenne d'une séance de travail?

178. Individualisez-vous l'entraînement par cheval?

○ 1.oui ○ 2.non

179. Si oui, selon quels critères?

☐ 1.Par lot (âge du cheval) ☐ 2.ses capacités
☐ 3.sa condition physique ☐ 4.ses points faibles
☐ 5.ses blessures antérieures ☐ 6.les courses courues
☐ 7.le moment dans la saison ☐ 8.autre

Ordonnez 3 réponses.

180. Si 'autre', précisez :

181. En début de saison, établissez-vous un programme d'entraînement annuel ?

○ 1.oui ○ 2.non

182. Réadaptez-vous votre programme après chaque course quand l'objectif n'est pas atteint?

○ 1.oui ○ 2.non

183. Si oui, précisez les adaptations ?

La question n'est pertinente que si réadaptation programme = "oui"

184. Réadaptez-vous votre programme après chaque course quand l'objectif est atteint?

○ 1.oui ○ 2.non

185. Si oui, précisez les adaptations ?

La question n'est pertinente que si réadaptation obj atteint = "oui"

186. Comment gérez-vous le planning d'entraînement? (grandes échéances, continuité dans la charge de travail, semaine déchargée, semaine = unité individuelle ?)

N° : _____

Enquête sur les pratiques d'alimentation et d'entraînement du cheval trotteur

5. LES PRATIQUES EN COURSE

187. Qui mène le plus souvent en course?

- ◯ 1.l'entraîneur
- ◯ 2.un driver de votre écurie
- ◯ 3.un driver sur la course
- ◯ 4.autre

188. Si 'autre', précisez :

189. Combien de heat réalisez-vous le plus souvent par cheval?

- ◯ 1.1
- ◯ 2.2
- ◯ 3.3

190. Combien de temps avant la course, le heat est-il réalisé?

191. Quel serait un heat type ?

192. Quelle est la durée moyenne d'un heat?

193. Couvrez-vous vos chevaux après le heat?

- ◯ 1.oui
- ◯ 2.non

194. Si oui, dans quel(s) but(s)?

- ☐ 1.Peur qu'il attrape froid
- ☐ 2.éponger la transpiration
- ☐ 3.maintenir la température corporelle et musculaire élevée
- ☐ 4.autre

Vous pouvez cocher plusieurs cases (2 au maximum).
La question n'est pertinente que si couverture ap heat1 = "oui"

195. Si 'autre', précisez :

196. Combien de temps avant le départ vous reprennez le cheval ?

197. Que faites vous sur la piste juste avant le départ ?

198. Quelle serait une récupération type après la course (tour de récup, aller au box en marchant,durée de chaque partie,...)?

199. Quelle en serait la durée totale?

200. Aidez-vous la récupération après une course (soir ou lendemain)?

- ◯ 1.oui
- ◯ 2.non
- ◯ 3.ca dépend

201. Par quel(s) moyen(s) ?

- ☐ 01.Douche
- ☐ 02.massage
- ☐ 03.bandes de repos
- ☐ 04.travail lèger
- ☐ 05.séance de marcheur/tapis roualnt
- ☐ 06.par l'administration d'un booster
- ☐ 07.par l'administration d'un drainant
- ☐ 08.par l'administration d'un réhydratant
- ☐ 09.paddock
- ☐ 10.autre

Ordonnez 5 réponses.

N° : _____

Enquête sur les pratiques d'alimentation et d'entraînement du cheval trotteur

6. FICHE CHEVAL au débourrage

202. Numéro du cheval

203. Nom du cheval

204. Année de naissance

205. Sexe

○ 1.Femelle ○ 2.male
○ 3.hongre

206. Quel est le poids estimé de ce cheval?

207. Etat corporel de ce cheval

Très maigre — Très gros

208. Comment définissez-vous ce cheval?

○ 1.très mince ○ 2.mince
○ 3.légèrement mince ○ 4.idéal
○ 5.légèrement gras ○ 6.gras
○ 7.très gras

209. Tempérament de ce cheval

Trop calme — Très nerveux

210. Comment définissez-vous le tempérament de ce cheval?

○ 1.Trop calme ○ 2.Légèrement trop calme
○ 3.idéal ○ 4.Légèrement trop nerveux
○ 5.trop nerveux

211. NEC par enquêteur

N° : _____

Enquête sur les pratiques d'alimentation et d'entraînement du cheval trotteur

6.1. Alimentation

212. Précisez l'alimentation de ce cheval en période d'entraînement(concentré, fourrage, supplémentation, quantité, heure de distribution, litière, eau,...)

6.2 Entraînement au débourrage

213. Planning du débourrage

N° : _____

Enquête sur les pratiques d'alimentation et d'entraînement du cheval trotteur

7. FICHE CHEVAL pré-entraînement jusqu'aux qualifications

214. Numéro du cheval

215. Nom du cheval

216. Année de naissance

217. sexe

- ◯ 1.Femelle
- ◯ 2.male
- ◯ 3.hongre

218. Quel est le poids estimé de ce cheval?

219. Etat corporel de ce cheval

Très maigre — Très gros

220. Comment définissez-vous ce cheval?

- ◯ 1.très mince
- ◯ 2.mince
- ◯ 3.légèrement mince
- ◯ 4.idéal
- ◯ 5.légèrement gras
- ◯ 6.gras
- ◯ 7.très gras

221. Tempérament de ce cheval

Trop calme — Très nerveux

222. Comment définissez-vous le tempérament de ce cheval?

- ◯ 1.Trop calme
- ◯ 2.Légèrement trop calme
- ◯ 3.idéal
- ◯ 4.Légèrement trop nerveux
- ◯ 5.trop nerveux

223. NEC par enquêteur

N° : _____

Enquête sur les pratiques d'alimentation et d'entraînement du cheval trotteur

7.1. Alimentation

224. Précisez l'alimentation de ce cheval en période d'entraînement(concentré, fourrage, supplémentation, quantité, heure de distribution, litière, eau,...)

7.2 Entraînement

225. Planning type d'une semaine d'entraînement

Question 225

	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
Type de séance							
Durée de la séance							
Volume de la séance (ex : 3x1000m)							
Vitesse (unité :.....)							
Durée de la répétition							
Distance de la répétition							
Durée de la récupération entre les séries = R							
Durée de la récupération entre les répétitions = r							
Echauffement -durée -intensité -allure -autres méthodes							
Récupération post exercice -durée -intensité -allure -autres méthodes							

N° : _____

Enquête sur les pratiques d'alimentation et d'entraînement du cheval trotteur

8. FICHE CHEVAL qui court

226. Numéro du cheval

227. Nom du cheval

228. Année de naissance

229. sexe2

- ○ 1.Femelle
- ○ 2.male
- ○ 3.hongre

230. Quel est le poids estimé de ce cheval?

231. Etat corporel de ce cheval

Très maigre — Très gros

232. Comment définissez-vous ce cheval?

- ○ 1.très mince
- ○ 2.mince
- ○ 3.légèrement mince
- ○ 4.idéal
- ○ 5.légèrement gras
- ○ 6.gras
- ○ 7.très gras

233. Tempérament de ce cheval

Trop calme — Très nerveux

234. Comment définissez-vous le tempérament de ce cheval?

- ○ 1.Trop calme
- ○ 2.Légèrement trop calme
- ○ 3.idéal
- ○ 4.Légèrement trop nerveux
- ○ 5.trop nerveux

235. NEC par enquêteur

N° : _____

Enquête sur les pratiques d'alimentation et d'entraînement du cheval trotteur

8.1. Alimentation

236. Précisez l'alimentation de ce cheval en période d'entraînement(concentré, fourrage, supplémentation, quantité, heure de distribution, litière, eau,...)

8.2. Courses

237. Age de qualification

238. Ce cheval a t-il était requalifié?

○ 1.oui ○ 2.non

239. Nombres de courses courues en moyenne par mois

240. Quelle est la distance habituellement courue?

241. Date de la dernière course

242. Date de la prochaine course

243. Nombre de course gagné

244. Nombre de course placé

8.3 Entraînement

245. Planning type d'une semaine d'entraînement

Question 245

	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
Type de séance							
Durée de la séance							
Volume de la séance (ex : 3x1000m)							
Vitesse (unité :.....)							
Durée de la répétition							
Distance de la répétition							
Durée de la récupération entre les séries = R							
Durée de la récupération entre les répétitions = r							
Echauffement -durée -intensité -allure -autres méthodes							
Récupération post exercice -durée -intensité -allure -autres méthodes							

Annexe 2. Tableau de données cardiorespiratoires pic obtenues au cours des deux tests incrémentaux T1 et T2 pour cinq chevaux trotteurs maintenus en conditions expérimentales contrôlées.

Chevaux trotteurs	**Tests**	**vVO_{2pic}**	**FC_{pic}**	**VO_{2pic}**	**VCO_{2pic}**	**QR_{pic}**	**Fr_{pic}**	**V_{Epic}**	**V_{Tpic}**	**La_{pic}**	**O_2pulse_{pic}**
		m/s	bpm	ml/min/kg	ml/min/kg		cycle/min	l/min	l	mmol/l	ml/cycle
A	T1	9,7	213	118,9	143,6	1,21	84,3	1588,2	18,8	13,4	272,4
	T2	9,7	207	82,51	105,24	1,28	82,7	1571,7	19,0	11,4	193,2
B	T1	11,1	221	119,2	138,3	1,16	98,4	1833,8	18,6	21,6	262,2
	T2	11,4	209	107,0	144,1	1,30	88,7	1810,9	20,4	23,8	237,1
C	T1	11,1	213	121,7	150,7	1,24	57,9	1330,2	23,0	18,3	254,7
	T2	10,6	208	84,8	88,0	1,04	57,4	1086,7	18,9	11,5	187,1
D	T1	11,4	222	101,4	112,2	1,11	107,6	1512,8	14,1	12,1	201,0
	T2	11,4	213	83,3	108,9	1,31	94,7	1539,3	16,3	22,2	174,3
E	T1	9,7	216	96,9	110,9	1,14	93,4	1679,9	18,0	13,5	241,6
	T2	10,6		86,8	104,5	1,20	87,3	1631,3	18,7	12,8	
Moyenne ± ET	**T1**	**10,6±0,3**	**217±5**	**111,6±11,5**	**131,1±18,4**	**1,17±0 ,05**	**88,3±19,0**	**1588,9±187,8**	**18,5±1,2**	**15,8±4,0**	**247,6±31,9**
	T2	**10,7±0,7**	**209±3**	**88,9±10,2**	**110,1±20,6**	**1,20±0,10**	**82,2±14,5**	**1527,9±268,1**	**18,6±1,5**	**16,3±6,2**	**197,9±27,3**

vVO_{2pic}, vitesse à laquelle la consommation d'oxygène pic (VO_{2pic}) est atteinte. FC_{pic}, fréquence cardiaque pic; VCO_{2pic}, volume de dioxyde de carbone pic; QR_{pic}, quotient respiratoire pic; Fr_{pic}, fréquence respiratoire pic, V_{Epic}, débit ventilatoire pic, V_{Tpic}, volume courant pic, Lapic, concentration pic en lactate sanguin, O_2pulse_{pic}, pic de consommation d'oxygène par battement cardiaque.

Annexe 3. Tableau de données cardiorespiratoires obtenues au cours de l'exercice promenade pour les six chevaux trotteurs maintenus en conditions expérimentales contrôlées.

Chevaux trotteurs	**Poids**	**VO_{2rest}**	**VO_{2ex}**	**VO_{2pic}**	**FC_{ex}**	**FC_{pic}**	**VCO_{2ex}**	**VCO_{2pic}**	**QR_{ex}**	**QR_{pic}**	**La_{pre}**	**La_{pic}**	**$T°_{pre}$**	**$T°_{pic}$**
	kg	ml/min/kg	ml/min/kg	ml/min/kg	bpm	bpm	ml/min/kg	ml/min/kg			mmol/l	mmol/l	C°	C°
A	489	3,6	34,2	40,6	154	170	37,3	34,00	0,86	0,84	0,54	0,70	37,60	38,4
B	457	3,3	37,2	40,7	138	141	33,4	32,07	0,78	0,79	0,30	0,41	37,30	38
C	473	2,1	28,9	42,7	138	136	30,1	36,92	0,88	0,86	0,52	1,26	37,20	38,4
D	465	3,0	28,3	44,6	144	185	31,8	36,3	0,79	0,82	0,12	0,17	37,50	37,8
E	503	3,5	25,3	35,4	109	157	26,2	28,03	0,85	0,79	0,36	0,59	37,40	38,3
F	497	4,00	31,5	41,8	119	128	32,4	30,78	0,84	0,73	0,34	0,84	37,60	38,7
Moyenne	**479**	**3,2**	**30,9**	**41,0**	**134**	**153**	**31,9**	**33,0**	**0,83**	**0,81**	**0,36**	**0,66**	**37,4**	**38,3**
ET	**20**	**0,7**	**4,31**	**3,10**	**17**	**22**	**3,67**	**3,4**	**0,04**	**0,05**	**0,15**	**0,37**	**0,2**	**0,3**

Consommation d'oxygène, exprimée en ml/min/kg, au repos (VO_{2rest}), l'exercice (VO_{2ex}), et au pic (VO_{2pic}). Fréquence cardiaque, en battement par min, pendant l'exercice (FC_{ex}) et au pic (FC_{pic}). Dioxyde de carbone rejeté, exprimé en ml/min/kg, pendant l'exercice (VCO_{2ex}) et au pic (VCO_{2pic}). Quotient respiratoire pendant l'exercice (QR_{ex}) et au pic (QR_{pic}). Concentration sanguine en lactate, exprimée en mmol/l de sang, au repos (La_{pre}) et au pic (La_{pic}) et la température rectale, en degrés Celsius, au repos ($T°_{pre}$) et au pic ($T°_{pic}$) obtenus pendant l'exercice promenade.

Annexe 4. Tableau de données cardiorespiratoires obtenues au cours de l'exercice jogging pour les six chevaux trotteurs maintenus en conditions expérimentales contrôlées.

Chevaux trotteurs	**Poids**	**VO_{2rest}**	**VO_{2ex}**	**VO_{2pic}**	**FC_{ex}**	**FC_{pic}**	**VCO_{2ex}**	**VCO_{2pic}**	**QR_{ex}**	**QR_{pic}**	**La_{pre}**	**La_{pic}**	**$T°_{pre}$**	**$T°_{pic}$**
	kg	ml/min/kg	ml/min/kg	ml/min/kg	bpm	bpm	ml/min/kg	ml/min/kg			mmol/l	mmol/l	C°	C°
A	491	2,2	53,9	52,7	143	141	45,2	42,9	0,84	0,81	0,48	0,56	36,9	38,6
B	459	1,7	52,9	41,2	172	154	44,1	36,8	0,84	0,89	0,42	0,34	37,0	38,6
C	466	2,4	54,0	47,5	153	145	44,9	39,6	1,14	0,83	0,39	0,54	37,0	38,7
D	465	1,4	46,0	46,5	169	166	40,6	39,8	0,89	0,85	0,18	0,2	37,3	38,7
E	516	3,9	42,2	39,2	128	122	34,0	32,8	0,81	0,84	0,34	0,63	37,4	38,1
F	487	3,8	50,3	59,1	129	145	43,3	55,1	0,87	0,93	0,35	0,27	37,6	38,4
Moyenne	481	2,6	49,9	47,7	149	145	42,0	41,2	0,90	0,86	0,36	0,42	37,2	38,5
ET	22	1,1	4,8	7,4	19	15	4,3	7,6	0,12	0,04	0,10	0,18	0,3	0,2

Consommation d'oxygène, exprimée en ml/min/kg, au repos (VO_{2rest}), l'exercice (VO_{2ex}), et au pic (VO_{2pic}). Fréquence cardiaque, en battement par min, pendant l'exercice (FC_{ex}) et au pic (FC_{pic}). Dioxyde de carbone rejeté, exprimé en ml/min/kg, pendant l'exercice (VCO_{2ex}) et au pic (VCO_{2pic}). Quotient respiratoire pendant l'exercice (QR_{ex}) et au pic (QR_{pic}). Concentration sanguine en lactate, exprimée en mmol/l de sang, au repos (La_{pre}) et au pic (La_{pic}) et la température rectale, en degrés Celsius, au repos ($T°_{pre}$) et au pic ($T°_{pic}$) obtenus pendant l'exercice jogging.

Annexe 5.1 Tableau de données cardiorespiratoires obtenues au cours de l'exercice parcours pour les six chevaux trotteurs maintenus en conditions expérimentales contrôlées.

Chevaux trotteurs	**Poids**	**VO_{2rest}**	**VO_{2wu}**	**VO_{2ex}**	**VO_{2pic}**	**VO_{2rec}**	**FC_{wu}**	**FC_{ex}**	**FC_{pic}**	**FC_{rec}**
	kg	ml/min/kg	ml/min/kg	ml/min/kg	ml/min/kg	ml/min/kg	bpm	bpm	bpm	bpm
A	490	3,8	48,4	102,4	104,8	29,6	161	183	185	135
B	461	2,8	58,2	102,2	110,0	40,2	169	203	204	143
C	462	4,5	59,0	112,3	121,2	42,2	162	204	205	140
D	463	1,6	37,9	68,2	69,6	27,1	147	184	182	132
E	510	3,7	39,9	59,0	57,7	17,2	161	174	188	142
F	481	3,4	53,3	93,6	96,1	41,8	136	181	199	146
Moyenne	**478**	**3,3**	**49,4**	**89,6**	**93,2**	**33,0**	**156**	**188**	**194**	**140**
ET	**20**	**1,0**	**9,1**	**21,2**	**24,6**	**10,1**	**12**	**12**	**10**	**5**

Consommation d'oxygène, exprimée en ml/min/kg, au repos (VO_{2rest}), pendant l'échauffement (VO_{2wu}), l'exercice (VO_{2ex}), la récupération (VO_{2rec}) et au pic (VO_{2pic}). Fréquence cardiaque, en battement par min, pendant l'échauffement (FC_{wu}), l'exercice (FC_{ex}), la récupération (FC_{rec}) et au pic (FC_{pic}).

Annexe 5.2 Tableau de données cardiorespiratoires obtenues au cours de l'exercice parcours pour les six chevaux trotteurs maintenus en conditions expérimentales contrôlées.

Chevaux trotteurs	**VCO_{2wu}**	**VCO_{2ex}**	**VCO_{2pic}**	**VCO_{2rec}**	**QR_{wu}**	**QR_{ex}**	**QR_{pic}**	**QR_{rec}**	**La_{pre}**	**La_{pic}**	**$T°_{pre}$**	**$T°_{pic}$**
	ml/min/kg	ml/min/kg	ml/min/kg	ml/min/kg					mmol/l	mmol/l	C°	C°
A	49,12	100,97	108,54	31,82	1,02	0,99	1,04	1,07	0,53	2,99	37,10	38,9
B	55,95	108,51	125,83	42,88	0,97	1,06	1,14	1,08	0,50	12,52	37,30	38,9
C	58,43	121,87	135,2	42,87	0,99	1,11	1,11	1,03	0,54	11,16	36,80	39,3
D	36,01	68,49	71,49	28,22	0,96	1,01	1,03	1,06	0,15	1,67	37,30	38,2
E	39,96	65,39	68,29	20,62	1,01	1,11	1,18	1,27	0,39	2,06	36,60	38,4
F	43,32	79,63	86,87	36,00	0,81	0,85	0,90	0,90	0,50	1,66	37,20	39,2
Moyenne	**47,13**	**90,81**	**99,37**	**33,74**	**0,96**	**1,02**	**1,07**	**1,07**	**0,44**	**5,34**	**37,05**	**38,82**
ET	**8,93**	**23,02**	**28,17**	**8,70**	**0,08**	**0,10**	**0,10**	**0,12**	**0,15**	**5,07**	**0,29**	**0,44**

Dioxyde de carbone rejeté, exprimé en ml/min/kg, pendant l'échauffement (VCO_{2wu}), l'exercice (VCO_{2ex}), la récupération (VCO_{2rec}) et au pic (VCO_{2pic}). Quotient respiratoire pendant l'échauffement (QR_{wu}), l'exercice (QR_{ex}), la récupération (QR_{rec}) et au pic (QR_{pic}). Concentration sanguine en lactate, exprimée en mmol/l de sang, au repos (La_{pre}) et au pic (La_{pic}) et la température rectale, en degrés Celsius, au repos ($T°_{pre}$) et au pic ($T°_{pic}$) obtenus pendant l'exercice parcours.

Annexe 6.1 Tableau de données cardiorespiratoires obtenues au cours de l'exercice interval pour les six chevaux trotteurs maintenus en conditions expérimentales contrôlées.

Chevaux trotteurs	**Poids**	**VO_{2rest}**	**VO_{2wu}**	**VO_{2ex}**	**VO_{2pic}**	**VO_{2rec}**	**FC_{wu}**	**FC_{ex}**	**FC_{pic}**	**FC_{rec}**
	kg	ml/min/kg	ml/min/kg	ml/min/kg	ml/min/kg	ml/min/kg	bpm	bpm	bpm	bpm
A	494	2,58	64,70	69,10	108,56	42,25	163	171	201	141
B	462	1,98	45,89	62,37	94,4	34,11	175	181	215	151
C	473	3,28	55,38	84,78	117,94	46,82	163	181	209	147
D	467	2,8	54,08	54,82	81,1	36,65	148,00	164	194	133,00
E	512	2,9	50,34	50,35	72,53	29,81	143	149	178	123
F	491	3,9	65,03	66,54	82,45	41,86	175	167	191	132
Moyenne	**483,17**	**2,91**	**55,90**	**64,66**	**92,83**	**38,58**	**161,17**	**168,83**	**198,00**	**137,83**
ET	**19,09**	**0,65**	**7,69**	**12,12**	**17,54**	**6,21**	**13,36**	**12,01**	**13,30**	**10,44**

Consommation d'oxygène, exprimée en ml/min/kg, au repos (VO_{2rest}), pendant l'échauffement (VO_{2wu}), l'exercice (VO_{2ex}), la récupération (VO_{2rec}) et au pic (VO_{2pic}). Fréquence cardiaque, en battement par min, pendant l'échauffement (FC_{wu}), l'exercice (FC_{ex}), la récupération (FC_{rec}) et au pic (FC_{pic}).

Annexe 6.2 Tableau de données cardiorespiratoires obtenues au cours de l'exercice interval pour les six chevaux trotteurs maintenus en conditions expérimentales contrôlées.

Chevaux trotteurs	**VCO_{2wu}**	**VCO_{2ex}**	**VCO_{2pic}**	**VCO_{2rec}**	**QR_{wu}**	**QR_{ex}**	**QR_{pic}**	**QR_{rec}**	**La_{pre}**	**La_{pic}**	**$T°_{pre}$**	**$T°_{pic}$**
	ml/min/kg	ml/min/kg	ml/min/kg	ml/min/kg					mmol/l	mmol/l	C°	C°
A	48,23	58,41	89,78	32,01	0,75	0,91	0,83	0,78	0,34	6,01	37,00	39,9
B	31,81	47,55	70,59	23,37	0,69	0,81	0,75	0,71	0,51	7,41	37,10	40
C	44,52	78,23	107,79	38,19	0,81	0,95	0,91	0,84	0,45	15,75	36,90	39,9
D	40,14	47,33	66,87	28,26	0,74	0,93	0,82	0,79	0,13	2,65	37,20	38,8
E	39,46	41,58	57,06	22,36	0,78	0,85	0,79	0,75	0,30	2,14	37,10	39,2
F	50,12	58,03	66,84	34,26	0,77	0,93	0,81	0,85	0,47	2,01	37,30	39,3
Moyenne	**42,38**	**55,19**	**76,49**	**29,74**	**0,76**	**0,90**	**0,82**	**0,79**	**0,37**	**6,00**	**37,10**	**39,52**
ET	**6,69**	**13,07**	**18,73**	**6,23**	**0,04**	**0,05**	**0,05**	**0,05**	**0,14**	**5,27**	**0,14**	**0,49**

Dioxyde de carbone rejeté, exprimé en ml/min/kg, pendant l'échauffement (VCO_{2wu}), l'exercice (VCO_{2ex}), la récupération (VCO_{2rec}) et au pic (VCO_{2pic}). Quotient respiratoire pendant l'échauffement (QR_{wu}), l'exercice (QR_{ex}), la récupération (QR_{rec}) et au pic (QR_{pic}). Concentration sanguine en lactate, exprimée en mmol/l de sang, au repos (La_{pre}) et au pic (La_{pic}) et la température rectale, en degrés Celsius, au repos ($T°_{pre}$) et au pic ($T°_{pic}$) obtenus pendant l'exercice interval.

Annexe 7. Tableau des dépenses énergétiques (kJ) au cours des quatre exercices (promenade, jogging, parcours et interval) et des trois phases d'exercice (échauffement, exercice et récupération) obtenues chez les six chevaux trotteurs maintenus en conditions expérimentales contrôlées.

Chevaux trotteurs	Exercices	DE_{wu}	DE_{ex}	DE_{rec}	DEtotal
A	Promenade		15240		15240
	Jogging		11556		11556
	Parcours	5641	5649	2972	14262
	Interval	8008	10933	4022	22963
B	Promenade		16250		16250
	Jogging		12523		12523
	Parcours	6374	5261	4213	15848
	Interval	5424	9586	3138	18148
C	Promenade		12580		12580
	Jogging		11620		11620
	Parcours	6638	5367	2594	14599
	Interval	3634	6487	2229	12350
D	Promenade		8320		8320
	Jogging		9647		9647
	Parcours	4475	3545	2696	10711
	Interval	6677	8969	3730	19376
E	Promenade		10894		10894
	Jogging		10563		10563
	Parcours	5495	3545	1112	10151
	Interval	6837	8877	2200	17914
F	Promenade		12429		12429
	Jogging		10805		10805
	Parcours	6717	5378	4526	16621
	Interval	5882	9437	2644	17962

Dépenses énergétiques (kJ) calculées pour les phases d'échauffement (DE_{wu}), d'exercice (DE_{ex}), de récupération (DE_{rec}) et pour l'exercice entier ($DEtotal=DE_{wu}+DE_{ex}+DE_{rec}$).

Annexe 8. Tableau des dépenses énergétiques (kJ), calculées à partir de la consommation d'oxygène (VO_2) et estimées à partir de la fréquence cardiaque (FC) et de la relation VO_2/FC, au cours des quatre exercices (promenade, jogging, parcours et interval) et des trois phases d'exercice (échauffement, exercice et récupération) obtenues chez les six chevaux trotteurs maintenus en conditions expérimentales contrôlées.

Chevaux trotteurs	Exercices	Méthode	DE_{wu}	DE_{ex}	DE_{rec}	DEtotal
A	Promenade	VO_2		15240		15240
		VO_2/FC		15682		15682
	Jogging	VO_2		11556		11556
		VO_2/FC		4325		4325
	Parcours	VO_2	5641	5649	2972	14262
		VO_2/FC	3915	3099	1665	8679
	Interval	VO_2	8008	10933	4022	22963
		VO_2/FC	4473	7375	2021	13868
B	Promenade	VO_2		16250		16250
		VO_2/FC		23281		23281
	Jogging	VO_2		12523		12523
		VO_2/FC		8672		8672
	Parcours	VO_2	6374	5261	4213	15848
		VO_2/FC	4372	4041	8302	16715
	Interval	VO_2	5424	9586	3138	18148
		VO_2/FC	4485	10537	5478	20500
C	Promenade	VO_2		12580		12580
		VO_2/FC		409		409
	Jogging	VO_2		11620		11620
		VO_2/FC		5188		5188
	Parcours	VO_2	6638	5367	2594	14599
		VO_2/FC	5070	5558	-743	9886
	Interval	VO_2	3634	6487	2229	12350
		VO_2/FC	5082	9837	839	15757

D	Promenade	VO_2		8320		8320
		VO_2/FC		18863		18863
	Jogging	VO_2		9647		9647
		VO_2/FC		11296		11296
	Parcours	VO_2	4475	3545	2696	10711
		VO_2/FC	5179	3274	3859	12312
	Interval	VO_2	6677	8969	3730	19376
		VO_2/FC	5091	8286	3866	17243
E	Promenade	VO_2		10894		10894
		VO_2/FC		10166		10166
	Jogging	VO_2		10563		10563
		VO_2/FC		5667		5667
	Parcours	VO_2	5495	3545	1112	10151
		VO_2/FC	2969	1919	1944	6833
	Interval	VO_2	6837	8877	2200	17914
		VO_2/FC	2589	5404	3023	11016
F	Promenade	VO_2		12429		12429
		VO_2/FC		16838		16838
	Jogging	VO_2		10805		10805
		VO_2/FC		11140		11140
	Parcours	VO_2	6717	5378	4526	16621
		VO_2/FC	6317	4105	5889	16310
	Interval	VO_2	5882	9437	2644	17962
		VO_2/FC	8354	9135	5214	22703

Dépenses énergétiques (kJ) calculées pour les phases d'échauffement (DE_{wu}), d'exercice (DE_{ex}), de récupération (DE_{rec}) et pour l'exercice entier ($DEtotal=DE_{wu}+DE_{ex}+DE_{rec}$).

Résumé **Contribution à l'estimation de la dépense énergétique liée à l'exercice chez le cheval trotteur attelé : utilisation des mesures de consommation d'oxygène et de fréquence cardiaque en conditions de terrain.**

L'activité physique, couramment exprimée en multiple des besoins du métabolisme de base, induit une dépense supplémentaire en termes d'énergie qui varie selon les exercices pratiqués et leurs caractéristiques. L'objectif de ce travail de thèse était d'estimer la dépense énergétique liée aux exercices d'entraînement chez le cheval trotteur attelé. Pour cela, la consommation d'oxygène (VO_2) et la fréquence cardiaque (FC) ont été mesurées en conditions de terrain sur des chevaux trotteurs maintenus en situation expérimentale contrôlée à partir d'un appareil portable de mesure des échanges respiratoires, le K4b² équin et l'Equimask. Les chevaux ont été soumis à quatre exercices d'entraînement utilisés chez le cheval trotteur : promenade, jogging, parcours et interval. Des mises au point méthodologiques se sont avérées nécessaires pour répondre à notre objectif de thèse et ont été menées de manière préliminaire à la quantification énergétique. Nos travaux ont montré que l'utilisation de l'analyseur portable des échanges gazeux permet d'obtenir des données cardiorespiratoires cohérentes, même à des vitesses de course élevées (12 m/s) et ainsi d'estimer la dépense énergétique liée aux différents exercices. Néanmoins pour une application pratique sur le terrain, nos résultats suggèrent que la fréquence cardiaque peut être utilisée pour estimer VO_2, sous conditions d'avoir individuellement établie la relation VO_2/FC au cours d'un test incrémental spécifique à la discipline du trot. Nos résultats confirment l'intérêt d'investiguer la dépense énergétique spécifique à chaque exercice puisque cette dernière est directement liée à l'intensité, à la durée et au type d'exercice pratiqué. En effet, nous avons proposé des coefficients de majoration de la dépense énergétique liée aux exercices en multiple des besoins liés au métabolisme de base. Les coefficients de majoration correspondent à 1,26 – 1,23 – 1,39 et 1,39 fois les besoins d'entretien pour les exercices promenade, jogging, parcours et interval respectivement. En moyenne, une semaine type d'entraînement chez un cheval trotteur induit une augmentation de ces besoins en énergie de 1,30 fois les besoins d'entretien. Bien que cette estimation nécessite d'être complétée en ajoutant la contribution anaérobie dans la fourniture énergétique mais aussi l'ensemble des pratiques complémentaires exercées par les chevaux trotteurs, nos travaux apportent de nouveaux éléments à la quantification de la dépense énergétique liée aux exercices spécifiques chez le cheval trotteur attelé.
Mots-clés : Cheval, dépense énergétique, consommation d'oxygène, fréquence cardiaque, conditions de terrain, exercices d'entraînement.

Abstract **Contribution to the estimation of the exercise energy expenditure in harnessed Standardbred trotters: utilization of the oxygen consumption and heart rate measurements in field conditions.**

Physical activity, commonly expressed as a multiple of basal metabolic requirements, induces an additional energy cost which varied with exercises and their characteristics. The objective of the present work was to estimate energy expenditure related to training exercises in the harnessed Standardbred trotters. Oxygen consumption (VO_2) and heart rate (HR) were measured in field conditions in trotters maintained under controlled situation using a portable device measuring respiratory gas exchanges, the equine K4b² and the Equimask. Trotters were submitted to four exercises used in the trotter training: 'promenade', 'jogging', 'parcours' and 'interval'. Preliminary to the quantification of the exercise energy expenditure, some methodological adaptations were needed. Our results showed that the use of portable analyzers provides consistent cardiorespiratory data even at high running speeds (12 m/s) and thus a good estimation of the exercise energy expenditure. However for practical application in the field, our results suggest that heart rate can be used to estimate VO_2, particularly when individual VO_2/HR curve was established previously. Our results confirm the interest of the investigation of the exercise energy expenditure which is directly related to the intensity, duration and type of exercise performed. Indeed, we proposed coefficients to increase total energy expenditure due to the exercise in multiple to the energy basal metabolism. Coefficients correspond to 1.26 - 1.23 to 1.39 and 1.39 times the maintenance requirements for 'promenade', 'jogging', 'parcours' and 'interval' exercises. A typical training week in trained trotter requires an increase of the energy 1.30 times maintenance requirements. Although this estimate needs to be completed by adding anaerobic contribution to the energy supply but also all additional physical activities performed by trained trotters, our work provides new evidence to quantify energy expenditure related to specific exercises in harnessed Standardbred trotter.
Keywords : Horse, energy expenditure, oxygen uptake, heart rate, field conditions, training exercises.