

Table des matières

<i>Liste des abréviations</i>	6
<i>Introduction</i>	7
I. Physiologie de l'effort d'endurance	8
A. Aspect musculaire (course/endurance)	8
a. Composition	8
b. Structure	8
c. Répartition	11
B. Thermorégulation	15
a. Balance thermique	15
- Gains de chaleur.....	15
- Transferts de chaleur.....	16
b. Régulation	17
C. Particularités physiologiques du cheval d'endurance	18
a. Fonction respiratoire.....	18
b. Fonction circulatoire	19
c. Aspect musculaire	19
d. Aspect thermorégulateur	20
II. Evaluation de l'état d'hydratation	22
A. Considérations générales	22
B. Outils et modifications hématologiques	25
- Globules Rouges ou Erythrocytes.....	25
- Protéines Plasmatiques.....	26
- Urée.....	26
- Créatinine.....	27
- Acide Lactique	27
- Ammoniaque.....	28
C. Aspect expérimental	30
D. Mécanismes physiologiques adaptatifs	32
a. Oxygénation tissulaire	32
b. Lutte contre la déshydratation	32
III. Etat actuel des connaissances et optimisation des performances	34
A. Aspect athlétique	34
a. Adaptation mentale.....	34
b. Adaptation musculaire.....	35
c. Endurance métabolique	35
- Objectifs	35
- Techniques	35
d. Endurance résistance	36
- Objectifs.....	36
- Techniques	36

B.Aspect diététique	38
a. Rappels de physiologie digestive	38
b. Recommandations diététiques actuelles.....	39
- Les glucides	39
- Les lipides	40
- Les protéines	41
- Les minéraux.....	41
C. Aspect hydro-électrolytique	43
a. Exercice et déshydratation.....	43
b. Détection et gestion.....	43
<i>IV. Elaboration d'un protocole expérimental</i>	46
A. Objectifs	46
B. Matériels et méthodes	47
- Population	47
- Protocole	48
- Calendrier.....	51
C. Résultats	52
<i>Conclusion</i>	53
<i>Bibliographie</i>	54

Liste des abréviations

ADH Hormone antidiurétique
ADP Adénosine diphosphate
ATP Adénosine triphosphate
°C Degrés Celsius
cc Centimètre cube
cyt c Cytochrome c
dl Décilitre
2,3 DPG 2,3 diphosphoglycérate
EPO Erythropoïétine
FADH₂ Flavine Adénine Dinucléotide forme réduite
FC Fréquence cardiaque
FR Fréquence respiratoire
g Gramme
GR Globule rouge
Ht Hématocrite
H₂O Molécule d'eau
H⁺ Proton ou Hydrogène ionisé
K⁺ Potassium ionisé
kg Kilogramme
Mg⁺⁺ Magnésium ionisé
mJ Millijoule
mmol Millimoles
MO Muqueuses oculaires
m/s Mètre par seconde
Na⁺ Sodium ionisé
NaCl Chlorure de Sodium
NADH Nicotinamide Adénine Dinucléotide forme réduite
NAD⁺ Nicotinamide Adénine Dinucléotide forme oxydée
NADPH Nicotinamide Adénine Dinucléotide Phosphate forme réduite
NADP⁺ Nicotinamide Adénine Dinucléotide Phosphate forme oxydée
NF Numération Formule sanguine
NH₃ Ammoniaque
O₂ Dioxygène
PA Pression Artérielle
PGAL Phosphoglyceraldéhyde
Ph Potentiel hydrogène (reflet de la concentration en ions hydrogène d'un liquide)
Pi Phosphate inorganique
Posmo Osmolalité du plasma
PT Protéines totales
PV Poids Vif
Pyruvate Acide pyruvique (C₃)
Q Ubiquinone
SuccinylCoA Succinyl Coenzyme A
TRC Temps de remplissage capillaires
Vet Gate Point de contrôle vétérinaire sur les courses d'endurance équestre
VO₂ Volume de dioxygène

Introduction

Depuis des siècles, l'homme utilise les capacités sportives naturelles exceptionnelles du cheval au service de sa locomotion et ce sur des distances parfois très importantes. Le développement de cette capacité naturelle à soutenir un effort durant plusieurs heures, souvent vital (enjeux guerriers ou commerciaux), a guidé de manière très importante la filière équestre dès ses origines. Le cheptel actuel résulte de cette recherche incessante d'une endurance accrue.

A ce jour, loin d'être abandonnée, cette aspiration à obtenir des chevaux plus aptes à soutenir des efforts de longues durées, voit ses enjeux modifiés avec l'élaboration d'un statut de discipline sportive à part entière. La création d'épreuves de fond bien distinctes des courses de vitesses classiquement organisées dans nos pays, conduit à une structuration poussée et spécifique de la préparation des chevaux d'endurance. Longtemps soumise à l'empirisme, celle-ci se base maintenant sur les résultats d'études des réactions et adaptations physiologiques spécifiques à cette discipline. En effet, soumis à un effort long, mais d'intensité moyenne et régulière, l'organisme équin dans son ensemble adopte une stratégie bien distincte de celle observée lors d'efforts intenses et de courtes durées, typiques de la course « sprint ».

Cette étude visera à préciser ces phénomènes physiologiques pressentis, à l'aide de données bibliographiques et expérimentales couplées. Quelle est la place des mécanismes liquidiens ? L'aspect musculaire de ces adaptations ? Les rôles de la thermorégulation et de l'hydratation ? Ces éléments abordés serviront de base scientifique à l'élaboration d'un protocole expérimental précis permettant par le suivi de paramètres biologiques simples en relation avec l'entraînement et la performance chez le cheval d'endurance, d'en mesurer pleinement les effets. Analysées, ces données, spécifiques à la population équine d'endurance, ouvriront alors la voie à de nouveaux progrès basés sur des connaissances précises.

Afin de bien comprendre cela, nous allons présenter, puis analyser les mécanismes adaptatifs à l'endurance, avant de proposer les pistes pour la gestion globale de la préparation du cheval à cette discipline. A l'étude de la physiologie de l'effort d'endurance, succédera une présentation des outils simples d'évaluation hématologique de l'état d'hydratation du cheval, puis des adaptations physiologiques mises en place. Ces dernières connues, nous proposerons un protocole expérimental précis en vue de caractériser leurs influences, en conditions de terrain, sur une population connue et représentative des chevaux actuellement présents dans cette discipline.

I. Physiologie de l'effort d'endurance

3, 9, 14, 24, 51, 52, 58, 59, 67

L'endurance, comme nous le rappelle le dictionnaire alphabétique et analogique de la langue française de Paul ROBERT, se définit comme une aptitude à résister à la fatigue ou à la souffrance. Cette description généraliste, correspond pourtant parfaitement bien à l'effort fourni lors d'une épreuve d'endurance équestre.

A. Aspect musculaire (course/endurance)

10, 12, 14, 22, 26, 29, 33, 39, 54, 55, 73, 74, 75

a. Composition

Les muscles squelettiques des vertébrés qui sont rattachés aux os et produisent les mouvements, se caractérisent par leur richesse extrême en eau. Elle représente, selon ANDREWS et SPURGEON (1), jusqu'à 75% de la masse musculaire, proportion à mettre en rapport avec les réactions métaboliques intenses s'y déroulant. Le reste de la masse se répartit principalement entre 20% de protéines contractiles (myosine 50 à 55%, actine 20 à 25%, tropomyosine 10 à 15%, et actomyosine), ou non, comme la myoglobine possédant un pouvoir de capture du dioxygène très important, assurant un environnement compatible avec l'élaboration de contractions locales fortes consommatrices d'énergie.

Le tissu musculaire contient également des hydrates de carbone, sous forme de glycogène (0.5 à 1% du poids du muscle) provenant du glucose sanguin, servant de réserve énergétique locale, et de la graisse, principalement localisée dans le tissu conjonctif.

Le tissu musculaire se définit par sa richesse en eau et protéines ; hydrates de carbone et graisse y sont très minoritaires.

b. Structure

La structure musculaire squelettique se caractérise par l'emboîtement d'unités parallèles de tailles de plus en plus réduites. Le muscle lui-même consiste en un faisceau de longues fibres disposées dans le sens de sa longueur. Chaque fibre est une cellule unique, munie de nombreux noyaux : c'est un assemblage de myofibrilles placées dans le sens de la longueur (Figure 1).

Ces myofibrilles se composent elles-mêmes de myofilaments fins, constitués de deux brins d'actine et d'un brin de protéines régulatrices enroulés les uns autour des autres. Afin de répondre à la forte activité métabolique aérobie du muscle, chaque unité est irriguée par une ou plusieurs artères. Chacune se ramifie alors librement dans le périnysium, puis un important réseau de capillaires (environ 4000 par mm² de coupe transversale) traverse l'endomysium et irrigue toutes les fibres musculaires. Ce réseau est particulièrement développé chez les chevaux entraînés à l'effort d'endurance, la durée des réactions aérobies n'étant limitée que par la disponibilité de substances alimentaires au niveau local. Les veines, chargées de l'évacuation rapide des déchets, eux aussi très nombreux lors d'effort prolongé, sont de distribution comparable, ne se distinguant que par la présence de valvules au sein de leur lumière. Les canaux lymphatiques, absents entre les différentes fibres musculaires, sont cantonnés du fascia jusqu'au périnysium.

Figure 1 : Organisation du muscle strié squelettique d'après SNOW et VALBERG (74).

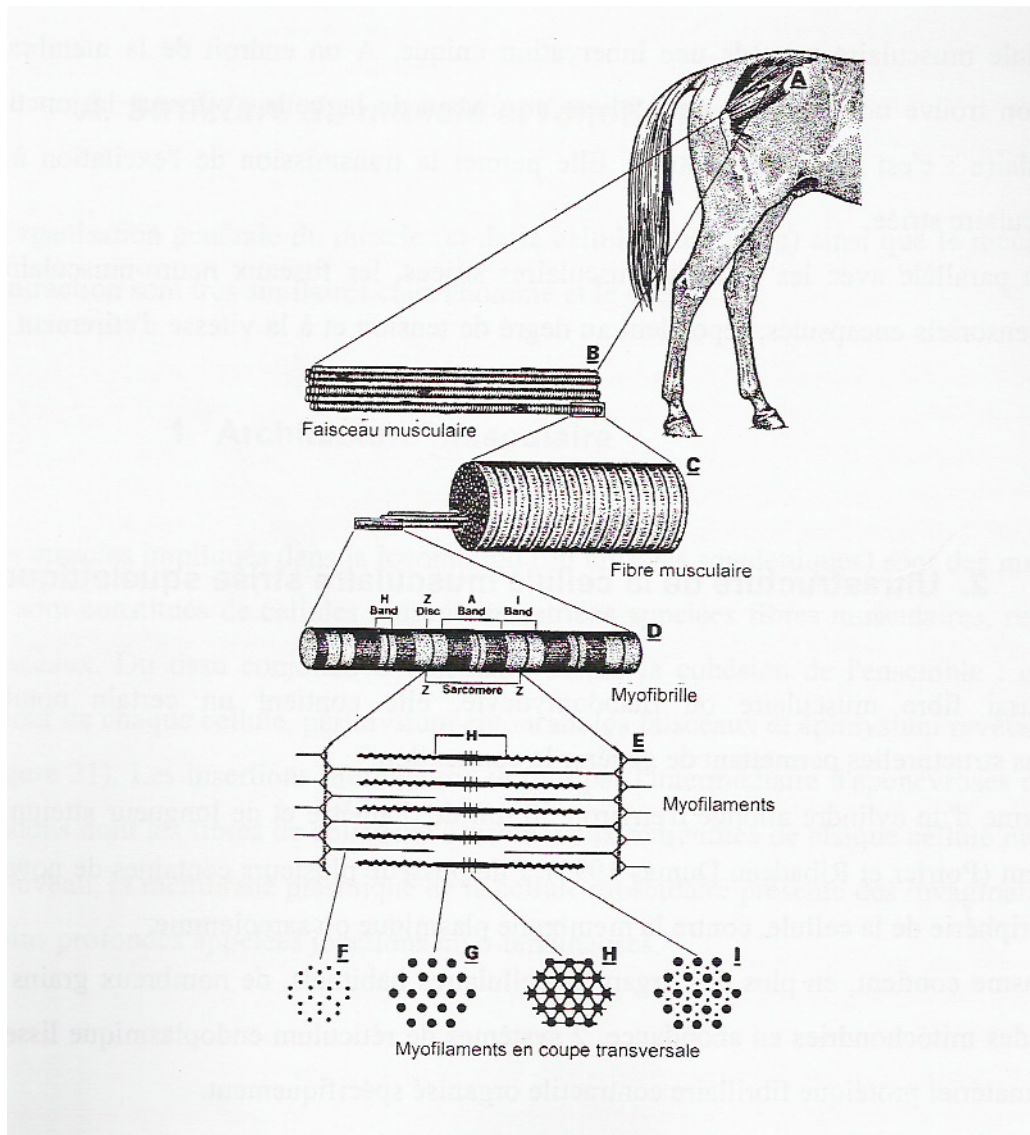
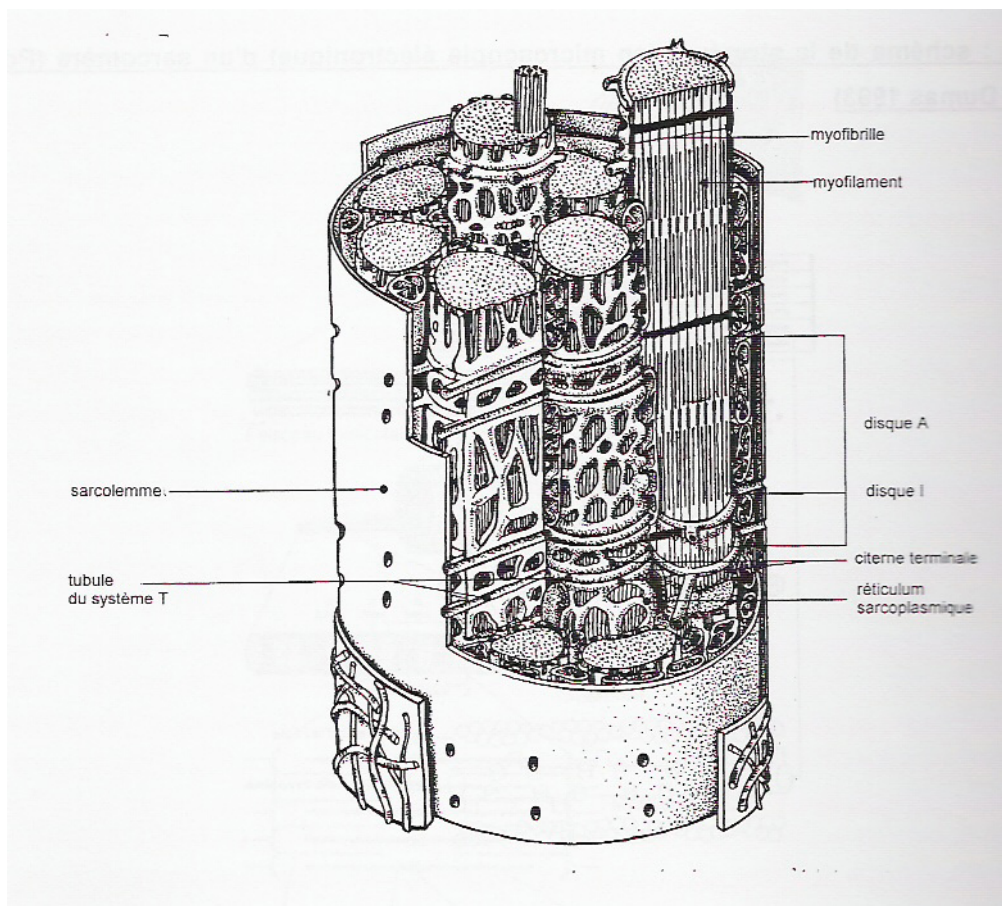


Figure 2 : Organisation des myofibrilles et des systèmes de réticulum endoplasmique lisse de la cellule musculaire striée squelettique, d'après EURELL (29).



Le faisceau musculaire se décompose en fibres musculaires constituées de myofibrilles, assemblages de myofilaments complexes. L'irrigation abondante assure à cet ensemble une capacité de contraction dans la durée.

c. Répartition

Basé sur une structure commune, le tissu musculaire du cheval voit pourtant ses composants se répartir de manière singulière, en fonction du type d'efforts demandés.

Les fibres de type I, à contraction lente, se caractérisent par leur richesse moindre en réticulum sarcoplasmique. Ceci favorise une persistance accrue du calcium au niveau cytoplasmique, avec une durée d'action de la secousse cinq fois plus longue que celle des fibres dites rapides. Ces fibres évoluent vers une spécialisation afin de mettre à profit un approvisionnement régulier en énergie; elles sont très abondamment irriguées, comprennent de nombreuses mitochondries et la protéine de capture/entreposage efficace du dioxygène : la myoglobine. Ce pigment rouge-brun, plus affin pour le dioxygène que ne l'est l'hémoglobine, par son abondance locale, permet de distinguer macroscopiquement ce type de fibres optimales pour un effort d'endurance de qualité. Ces tissus s'identifient par leur grande faculté de fonctionner de manière aérobie, permettant une combustion complète, sans déchet, des substances énergétiques. Ils sont capables d'oxyder des lipides en plus des glucides, qu'ils contribuent à épargner, au profit d'une forte aptitude à prolonger l'effort. Ces structures se montrent donc peu fatigables. En contre partie, leur vitesse de contraction relativement lente, en rapport avec un débit énergétique modéré (à bon rendement) limite l'intensité du travail fourni. Ce sont donc les fibres propices à l'effort d'endurance.

Les fibres de type IIB, ont des caractéristiques opposées. Leur faible potentiel aérobie impose une combustion exclusivement glucidique, largement anaérobie et donc incomplète, qui aboutit à l'accumulation d'acide lactique. Cette molécule renferme encore 9/10 de l'énergie potentielle du glycogène utilisé et constitue une cause ou au moins un témoin de fatigue précoce lors d'exercice intense. Le rendement énergétique est alors médiocre et entraîne de fortes déperditions thermiques. En revanche, les fibres IIB, possèdent une vitesse de contraction très rapide principalement favorable à l'effort de puissance et de sprint court. Grâce à un entraînement adapté, elles peuvent évoluer partiellement vers le type I ou IIA (phénomène vérifié chez le cheval de trot).

Les fibres de type IIA possèdent des propriétés métaboliques intermédiaires. Leur approvisionnement énergétique provient quasi exclusivement des glucides. Grâce à un bon métabolisme aérobie, ceux-ci subissent majoritairement une combustion complète jusqu'au stade du gaz carbonique, sans accumulation dispendieuse et dangereuse d'acide lactique. Le rendement énergétique est excellent, et la perte de chaleur reste donc modérée. Par conséquent, ces fibres II A sont assez économes en glycogène, autorisant la poursuite d'un effort intense. Comme elles se contractent aussi rapidement que les fibres II B, ce sont les fibres spécialisées de la tenue de la vitesse. De ce fait, elles sont particulièrement utiles au sprint long, tel que celui du cheval de course.

Tableau 1 : Caractéristiques des types de fibres musculaires chez l'homme et le cheval, d'après SNOW et VALBERG (74), THAYER *et al.* (75) et DEMONCEAU (23).

	<u>Type I</u>	<u>Type II_A</u>	<u>Type II_B</u>
<u>Caractéristiques contractiles:</u>			
-vitesse de contraction	+	++	+++
-force de contraction	+	++	+++
-résistance à la fatigue	+++	++	+
<u>Activité de la myosine ATPase :</u>			
-après incubation à pH=9,4	+	+++	+++
-après incubation à pH acide (4, 3-4, 6)	+++	+	++
<u>Potentiels métaboliques :</u>			
-glycolyse	+	++	+++
-oxydation	+++	++	+
<u>Teneurs en substrats énergétiques :</u>			
-glycogène	++	+++	+++
-lipides	+++	++	+
<u>Autres caractéristiques :</u>			
-vascularisation capillaire	+++	++(+)	+
-surface des fibres	+	++	+++

D'autres fibres, telles que le type C, seraient des formes immatures, capables d'évoluer vers l'un des types précédents et d'expliquer les quelques variations de proportions des différents types en fonction de l'âge et de l'entraînement.

La composition musculaire globale est la résultante de diverses influences. L'une de celle-ci est la génétique. On observe en effet de nombreuses disparités entre les différentes races et lignées chevalines, conduisant à des utilisations bien différentes.

Tableau 2 : Type de fibres musculaires en fonction de la race (en % du total), selon WOLTER (79).

Fibres / Races	I	II _A	II _B	II _{A+B}
Quarter Horse	9	51	40	91
Pur Sang	10	59	27	86
Arabe	14	48	38	86
Trotteur	21	52	31	84
Poney	22	40	38	78
Cheval de chasse	31	37	38	75

Le Quarter Horse, race américaine ultra rapide sur le quart de mile (d'où son nom), apparaît comme un super sprinter, dont les muscles sont riches en fibres rapides, plus que le Pur sang anglais, le trotteur et surtout le cheval de raid. Au contraire, les chevaux réussissant le mieux en course d'endurance se distinguent par la richesse de leurs muscles en fibres lentes.

Ce rapport de composition initialement déterminé génétiquement peut être modifié judicieusement par un entraînement spécifique du cheval aux efforts d'endurance.

Par la production d'un travail musculaire intense, mais régulier, on observe une augmentation de l'épaisseur et de la dureté du sarcolemme et du tissu conjonctif musculaire, sans augmentation massive de sa taille globale. Ceci entraîne une compression accrue des capillaires, l'apport de dioxygène nécessaire au travail aérobie d'endurance devenant alors insuffisant, ce qui stimule progressivement une augmentation des ramifications vasculaires locales, sous forme de capillaires. On observe de même une hausse des enzymes oxydatives et à plus long terme des fibres rouges (type I et II A) au sein de la population musculaire globale, ce qu'illustrent les travaux de 1991 de LOPEZ-RIVERO *et al.* (55). On veillera tout de même à ne pas pratiquer un excès d'entraînement de fond, pouvant induire quelques dérives vers le type I, conduisant à des chevaux certes infatigables mais excessivement lents.

Le tissu musculaire du cheval présente une grande variabilité individuelle de structure et d'organisation. Chevaux d'endurance et de courses présentent ainsi des compositions musculaires sensiblement distinctes.

B. Thermorégulation

7, 9, 11, 14, 18, 19, 38, 44, 56

Par définition, les homéothermes sont des organismes dont le fonctionnement impose le maintien absolu de leur température interne dans des valeurs précises oscillant dans le cas du cheval entre 37 et 40°C. Au cours de tout effort, leur organisme produit, et éventuellement reçoit, de manière irrépressible de la chaleur, d'où l'importance d'un système efficace d'évacuation de celle-ci.

En effet, le travail physique provoque une augmentation du métabolisme basal, producteur d'une quantité non négligeable de chaleur, puisque pour un effort donné, on considère qu'environ 80% de l'énergie produite l'est sous forme thermique. A cela peuvent s'ajouter les facteurs environnementaux tels que le rayonnement solaire, la température ambiante, l'humidité et même les caractéristiques éoliennes du milieu.

Afin de minimiser tout effet délétère consécutif à cette production - parfois excessive - de chaleur, il est nécessaire d'acclimater les chevaux pour adapter leurs mécanismes de dissipation à l'environnement dans lequel ils évoluent.

a. Balance thermique

Afin de maintenir une valeur relativement constante de leur température corporelle, les chevaux tendent à équilibrer leurs gains et pertes de chaleur métabolique et à maintenir leur balance thermique.

On définit pour des conditions d'espèce, de race et d'état corporel donnés, une température extérieure particulière, dite de neutralité thermique, pour laquelle la dépense énergétique pour la thermorégulation est minimale. Cet état n'est que virtuel, l'organisme de tout animal en activité, étant soumis à un déséquilibre permanent entre gains et pertes de chaleur.

- Gains de chaleur

Au cours d'un effort maximal, la consommation basale d'oxygène chez le cheval augmente jusqu'à 60 fois, pour atteindre 140 à 187 ml/kg/min, avec une production de chaleur de 1,4 mJ/min, aboutissant à une hausse de 1°C de la température corporelle par minute, en cas de non dissipation de cette énergie.

Dans le cas de l'effort d'endurance, un cheval évoluant à une vitesse de 8 m/s, produit ainsi 0,6 mJ par minute, soit une augmentation potentielle de 21°C par heure.

Or, à l'exception de la hausse aiguë d'environ 4°C, observée lors des efforts de sprint durant 1 à 3 minutes chez le Pur sang de course, et dissipée rapidement dès la cessation de l'effort, l'organisme ne peut tolérer de telles amplitudes de températures. Ainsi, de telles productions de chaleur ne sont concevables que dans le cadre d'une perte régulière d'énergie thermique au cours de l'effort.

- Transferts de chaleur

La chaleur se transmet d'un corps à un autre en suivant un gradient thermique. Ces échanges se font par le biais de quatre mécanismes principaux :

La conduction correspond au transfert direct de chaleur entre deux surfaces en contact effectif, avec perte ou gain de chaleur en fonction du différentiel de températures entre les deux corps. Elle se réalise principalement au niveau de la tête, des membres et du cou, sous l'influence directe et proportionnelle de la température cutanée et inversement proportionnelle à l'épaisseur du pelage (limitation accrue de ces pertes lors de la période hivernale). Dans le cas du cheval sportif, ce mécanisme, appuyé par la faible conductivité thermique de l'air est quasi négligeable.

La convection se caractérise par le transfert de chaleur entre deux milieux de températures différentes. Pour le cheval sportif, ce phénomène est important lorsque l'environnement est à température peu élevée, par échanges entre l'air emprisonné dans le pelage et l'air ambiant et surtout au sein du tractus respiratoire sous l'influence directe de la ventilation pulmonaire.

La radiation correspond à des ondes électromagnétiques émises à la surface du corps, principalement les radiations solaires au niveau de la peau, selon sa température propre. En cas d'exposition à des radiations solaires trop intenses, la production de chaleur induite peut représenter jusqu'à 15 % de la production de chaleur métabolique totale.

L'évaporation de sueur joue un rôle majeur chez le cheval athlète. Elle dépend du gradient de pressions de vapeur d'eau entre la surface corporelle et l'environnement, ainsi que du mouvement d'air existant à la surface du corps. La dissipation d'un litre d'eau permet d'évacuer jusqu'à 2,4 mJ, soit l'équivalent de six minutes d'exercice d'endurance ou deux minutes de sprint environ. Pendant l'effort, en cas de taux d'humidité peu élevé, ce mécanisme très efficace permet jusqu'à 65 % de dissipation de la chaleur corporelle totale. Par contre, une forte humidité ambiante réduit le différentiel de pression, minimise donc l'évaporation, et aboutit à l'accumulation de sueur en surface de la peau, minorant progressivement l'évaporation.

On observe de même une évacuation importante au sein du tractus respiratoire par saturation progressive de l'air ambiant inspiré en vapeur d'eau, en relation directe avec l'importance des surfaces présentes. La perte de chaleur estimée est ainsi comprise entre 15 et 25 % de la perte totale de chaleur corporelle, et permet selon la température ambiante et le rythme ventilatoire, de palier les pertes de sueur parfois insuffisantes.

Afin de conserver la stabilité de sa balance thermique, le cheval équilibre ses gains et transferts de chaleur. Ces derniers sont principalement réalisés par le biais de la conduction, la convection, la radiation et l'évaporation dans des proportions variant avec l'intensité de l'effort et les conditions environnementales dans lesquelles ils se déroulent.

b. Régulation

Au cours de l'effort, ces différents mécanismes sont sous l'influence directe de centres thermorégulateurs localisés dans l'hypothalamus. Ce dernier perçoit et intègre les différents stimuli en provenance des multiples thermorécepteurs périphériques localisés dans la peau, les muscles squelettiques, l'abdomen et la moëlle épinière, et émis selon l'intensité de l'effort. Il induit alors une activation adéquate des effecteurs primaires que sont le système circulatoire et les glandes sudoripares, dans le cadre de la thermorégulation.

En cas d'augmentation de la chaleur, le flux sanguin est progressivement redirigé vers la surface cutanée (principalement au niveau des zones exposées), avec une hausse du débit cardiaque global et une vasodilatation. Par contre, dans le cas d'une température extérieure trop basse, ce fonctionnement est partiellement minoré par des vasoconstrictions locales. Ces mécanismes se trouvent sous la commande principale du système nerveux sympathique, agissant sur les vaisseaux par ouverture ou fermeture des différentes anastomoses qui les jalonnent.

La production de sueur est initiée à une certaine valeur de température et augmente progressivement avec l'intensité de l'augmentation de cette dernière. Chez le cheval, malgré un contrôle par le système sympathique de la production de sueur, celui-ci n'influence pas directement le flux sanguin des glandes. L'augmentation de production résulte d'une stimulation de récepteurs bêta-adrénergiques, par les médiateurs du système sympathique : noradrénaline et adrénaline.

Le maintien de la température corporelle est assuré par l'hypothalamus agissant sur les systèmes circulatoire et sudoripare.

Doté de systèmes de régulation fine de sa température corporelle, le cheval d'endurance soumis à diverses contraintes environnementales, doit pouvoir les utiliser au mieux par un entraînement cohérent et progressif, ceci afin d'éviter tout passage vers une situation pathologique dont les prémices, primordiaux à détecter feront l'objet d'une étude détaillée.

C. Particularités physiologiques du cheval d'endurance

2, 10, 21, 24, 77

a. Fonction respiratoire

L'effort de type endurance se définit par sa durée et non son intensité. Inversement, les contraintes imposées aux chevaux de courses de vitesse, se caractérisent par une violence et une promptitude spectaculaires, aboutissant à la mise en place de réactions physiologiques de type défensives. Dans cette discipline, les mécanismes adaptatifs utilisés, correspondent à une exacerbation de ceux mis en place lors du réflexe primaire de fuite très développé dans l'espèce vulnérable qu'est le cheval. Ainsi, afin d'obtenir très rapidement et sur une courte durée une production énergétique suffisante, le métabolisme cellulaire favorise progressivement la mise en place de réactions fermentaires, non dépendantes d'apports en oxygène, mais de rendement globalement faible au regard des déchets rapidement produits et potentiellement délétères au fonctionnement général de l'organisme.

A l'inverse, afin de poursuivre longtemps un effort d'intensité sub-maximale, l'organisme du cheval d'endurance favorise un métabolisme cellulaire aérobie. Après une très courte période d'anaérobiose inhérente à tout effort musculaire, le muscle fonctionne uniquement à l'aide de la respiration cellulaire. Cette dernière est entièrement dépendante d'un apport constant et régulier du tissu en dioxygène et en substrats énergétiques. La rapidité de prise de relais de ce métabolisme aérobie, peu générateur de déchets, est alors un élément caractéristique de l'efficacité de l'entraînement du cheval d'endurance.

De plus, au delà de l'aspect uniquement cellulaire, l'apport global en oxygène à l'organisme est progressivement amélioré avec une fréquence respiratoire certes augmentée, mais de manière rationnelle et proportionnelle à l'effort (pas de tachypnée hautement consommatrice d'énergie et inefficace) et une amplitude respiratoire très largement amplifiée afin d'optimiser la surface pulmonaire disponible. Le rapport amplitude / fréquence détermine la ventilation alvéolaire

Le cheval d'endurance vise à optimiser l'efficacité de ses mouvements respiratoires par une augmentation d'amplitude, supérieure à celle de leur fréquence. Ce phénomène commun à tout être vivant à l'effort est ici affûté par le cheval au fur et à mesure de sa progression sportive.

b. Fonction circulatoire

27, 31, 41, 42, 70

La composition des différents milieux liquidiens de l'organisme équin est globalement identique au sein des populations de sprinteurs ou de marathoniens. La principale singularité se trouve dans leur gestion.

Au cours d'un effort bref de sprint, l'organisme met en place uniquement les mécanismes de régulation rapide caractérisés par une tachycardie et une hypertension circulatoire globales. Cela aboutit à une augmentation du débit cardiaque.

Afin de poursuivre sur le long terme ses productions énergétiques, le marathonien adopte lui, un rythme cardiaque majoré, certes, mais de manière non spectaculaire et surtout couplé à une augmentation de la puissance cardiaque assurant un meilleur débit global sans pour autant aboutir à une consommation énergétique cardiaque trop importante conduisant potentiellement à une fatigue musculaire myocardique.

Le cheval d'endurance doit donc établir une distribution circulatoire stable, mais efficace pour l'organisme dans son intégralité, et non uniquement dirigée vers la masse musculaire.

Ainsi, dans les reins, on observe ainsi un fonctionnement évitant au maximum toute perte hydro-électrolytique exagérée, tout en assurant une épuration organique suffisante. L'efficacité de cette dernière, reflet de la progression du cheval athlète, est évaluable par le biais de dosages urinaires et sanguins classiques : urée, créatinine...

La stabilité de sa distribution circulatoire, couplée à des phénomènes d'épuration organique optimaux, sont des éléments indispensables à la poursuite de tout effort par le cheval d'endurance.

c. Aspect musculaire

10, 12, 17, 20, 26, 28, 37, 39, 46, 47, 49, 54, 68

Cet aspect également primordial de la différenciation entre effort de course de sprint et effort d'endurance, s'inscrit pourtant avec une certaine lenteur comme facteur de progression des performances équestres. En effet, comme nous l'avons vu, plusieurs types de fibres musculaires existent, d'importances et de répartitions différentes au sein des populations équines, sous l'influence de leur utilisation respective.

Ainsi, chez le cheval sprinter (type Pur sang anglais), la population majoritaire retrouvée et souhaitée au sein des grandes lignées, est celle dite de type anaérobie, correspondant au type II.

A l'inverse, la musculature de type I aérobie, en relation directe avec la capacité de résistance à la fatigue du cheval, est recherchée chez l'athlète d'endurance. En effet, soutenue par des bases génétiques et donc dépendante de la lignée et de la race du cheval (chez les chevaux arabes principalement), cette population se développe progressivement au cours de l'entraînement de l'animal, aboutissant à une optimisation de l'efficacité de sa masse musculaire, au moins aussi importante que la hausse de volume musculaire du cheval sprinter. Dans le cas du cheval d'endurance le volume global reste stable, c'est la composition qui assure la progression.

Comme en témoignent les travaux réalisés en 1991 par LOPEZ-RIVERO *et al.* (55), malgré un ratio type I / type II relativement stable génétiquement, l'entraînement a la capacité de diriger spécifiquement la composition du type II. La population musculaire du cheval d'endurance correctement managé, se dirige alors sensiblement vers une progression des fibres de type IIB oxydatives au détriment des IIB non oxydatives.

De plus, l'importance croissante prise par les fibres rouges au sein de l'organisme du cheval d'endurance permet globalement une meilleure qualité de contraction, grâce à une meilleure disponibilité des nutriments, caractérisée par une utilisation spécifique et complète des lipides par le muscle. Les acides gras libérés par la lipolyse deviennent une source énergétique croissante pour le travail musculaire. La consommation lipidique permet alors d'épargner au mieux le glycogène musculaire et de prolonger la production d'un effort soutenu, ce qui est la définition même de l'effort d'endurance.

L'entraînement du cheval à l'endurance est à l'origine d'une modification des propriétés contractiles et surtout des capacités oxydatives de ses fibres musculaires, tandis que l'entraînement au sprint favorise la modification du volume du muscle.

d. Aspect thermorégulateur

38, 43, 44, 45, 56, 64

Au regard du métabolisme global, ce qui guette tout cheval athlète, en tant qu'homéotherme est l'hyperthermie. Or, dans le cas du sprinteur cette production de chaleur si elle est spectaculaire, est également très fugace, ce qui en limite les conséquences. Dans le cadre d'un raid d'endurance équestre, cette hausse de température est certes moins rapide, mais tout aussi potentiellement dangereuse par sa durée. Afin de limiter ces effets néfastes, le cheval d'endurance tend à exacerber tous les mécanismes thermorégulateurs, en fonction du milieu dans lequel il évolue.

C'est cette adaptabilité progressive à l'évacuation rapide de la chaleur induite par l'effort et ce, selon les caractéristiques propres à l'environnement, indispensable à toute progression, qui fait toute la différence avec le cheval sprinter, pour qui, au regard de la durée d'effort, la perception des éléments climatiques externes, revêt une importance très secondaire.

Afin d'éviter l'hyperthermie, le cheval d'endurance exacerbe sa perception environnementale et adapte très rapidement sa thermorégulation.

La singularité du cheval d'endurance s'inscrit donc dans de très divers domaines physiologiques :

- recherche d'une efficacité ventilatoire supérieure privilégiant l'augmentation de l'amplitude à l'augmentation de la fréquence ;
- maintien d'une irrigation organique et rénale régulière et suffisante, sans shunt d'organes ;
- évolution de la population musculaire favorisant les mécanismes oxydatifs, plus lents, mais d'efficacité durable ;
- affûtage précis de la thermorégulation, par le biais d'une réactivité accrue.

Au travers de ces différents aspects, il ressort nettement la place clef occupée par la réhydratation, au sein de l'effort d'endurance. La position de celle-ci, distingue définitivement le cheval d'endurance du cheval sprinter, pour qui compte principalement la puissance musculaire immédiate. C'est donc par une meilleure évaluation de l'état d'hydratation que l'on va pouvoir orienter la progression spécifique du cheval d'endurance.

II. Evaluation de l'état d'hydratation

4, 5, 7, 9, 13, 14, 15, 23, 25, 27, 30, 32, 45, 59, 67, 71

A. Considérations générales

16, 31, 48, 50, 60

Dans le cas des études portant spécifiquement sur le cheval d'endurance, l'état d'hydratation globale de l'animal, est évalué par simple extrapolation des résultats obtenus par la mesure du volume sanguin. En effet, une fois le volume érythrocytaire connu, on détermine le volume plasmatique, qui selon les règles régissant les échanges liquidiens intra-corporels, est un bon reflet de l'hydratation corporelle.

A l'état de repos, la quantité globale d'eau corporelle reste relativement constante jour après jour. Ses origines sont principalement la prise de boisson et de nourriture, ainsi que l'aboutissement de certaines réactions du métabolisme cellulaire ; les pertes se font par les urines, les échanges gazeux respiratoires, la surface cutanée (sueur et diffusion simple depuis le milieu interne) part très importante lors d'effort musculaire prolongé, et plus accessoirement dans les selles.

Seules l'ingestion liquidienne et l'excrétion urinaire sont contrôlées dans le but de réguler le volume hydrique corporel total.

La soif et la prise de boisson, sont régulées par l'hypothalamus qui perçoit au niveau de cellules spécifiques, toute osmoconcentration excessive (principalement par le biais de la concentration en NaCl), synonyme de déshydratation. Le mécanisme d'abreuvement se déclenche alors, jusqu'à la perception du retour à l'équilibre osmotique initial. De plus, les volorécepteurs présents dans la paroi des grosses veines et des atrioms cardiaques, en percevant une diminution du volume sanguin, stimulent la sécrétion d'hormone antidiurétique (ADH), afin d'adapter les pertes d'eau urinaires.

Idéalement, le niveau d'hydratation d'un individu est maintenu sensiblement constant. Mais, les apports d'eau étant discontinus et les pertes, elles, continues, il se développe sans cesse un état de déshydratation plus ou moins poussé.

Dès le début de l'effort, une augmentation marquée du métabolisme permet de fournir l'énergie nécessaire à la contraction musculaire, par conversion d'énergie chimique en énergie mécanique, avec multiplication par 10 à 20 du métabolisme de base selon HODGSON *et al.* (45). Ces mécanismes de rentabilité médiocre : jusqu'à 80% de l'énergie est perdue sous forme de chaleur ; le système thermorégulateur est alors mis largement à contribution, afin de limiter la hausse de température corporelle néfaste à la poursuite de l'exercice.

Ainsi, par le biais de thermorécepteurs hypothalamiques et périphériques, sensibles aux variations de température, le thermostat hypothalamique détecte le décalage entre la température de référence et celle perçue, avec mise en route de mécanismes de thermolyse adéquats, principalement l'évaporation.

Ce mécanisme de dissipation de chaleur, induite par l'effort, est lui-même divisible en trois processus physiologiques distincts :

- la perspiration insensible, correspondant à une perte d'eau incontrôlable à travers l'épiderme par un mécanisme différent de la transpiration, mais d'influence moindre.

- l'évaporation d'eau au niveau des muqueuses de l'appareil respiratoire, non négligeable en quantité. Cette perte dépend de l'humidité de l'air ambiant et de la fréquence respiratoire. On admet en moyenne que 0,03 g d'eau sont dissipés pour chaque litre d'air expiré selon HEILEMANN *et al.* (41).

- l'évaporation de la sueur, phénomène majoritaire chez le cheval et l'homme, dépend du gradient de pression en vapeur d'eau entre la peau et l'air ambiant. La production de sueur est d'autant plus importante que l'exercice est intense. Ainsi, un exercice à 90% de VO₂ max, conduit à l'élaboration de 40 ml/m²/min contre 22 ml/m²/min pour un autre à 40% de VO₂ max selon HODGSON *et al.* (44).

Elle est également liée à la température ambiante, car la quantité de sueur produite est d'autant plus importante que la température extérieure est élevée, et ce, quelle que soit l'intensité de l'exercice, selon MAC CUTCHEON et GEOR (61).

Quantitativement, ces pertes peuvent atteindre jusqu'à 15 litres par heure, soit 4 à 5% du poids vif, au cours de courses en situation de stress thermique et hydrique poussés, selon BENAMOU-SMITH (7).

Même si les mécanismes précis ne sont actuellement pas élucidés, MAC CUTCHEON et GEOR (62) ont mis en évidence par leurs travaux, la diminution de production totale de sueur au cours d'un exercice prolongé dès lors que celui-ci s'inscrit dans le cadre d'un entraînement progressif du cheval d'endurance. En effet, même si ils observent une hausse globale de la production sudorale durant les 14 premiers jours d'un entraînement d'intensité modéré, la poursuite de celui-ci aboutit à une baisse de 12% du taux de production initial, au bout de 8 semaines.

Ainsi, par une gestion raisonnée de ce dernier, on peut limiter cette perte liquidienne majeure, et ainsi, les risques de déshydratation qu'elle fait courir.

Le premier signe de déshydratation est la sensation de soif, observé pour une perte égale à seulement 1 à 2 % du poids corporel. A partir de 10% de perte, on passe à un stade sévère, plus fréquemment observé chez les chevaux en comparaison à l'homme. En effet, le cheval possède une sueur hypertonique, très riche en électrolytes.

Chez l'homme, la perte de sueur hypotonique, aboutit à une déshydratation très transitoirement extracellulaire. En effet, rapidement, par équilibration des pressions le milieu intracellulaire perd progressivement de l'eau au profit de l'extracellulaire. Il résulte alors une déshydratation intracellulaire. Or, c'est cette dernière qui déclenche les mécanismes restaurateurs de la volémie : soif...

A l'inverse chez le cheval d'endurance, la sueur étant hypertonique, c'est la composante extracellulaire des fluides qui est primairement modifiée, avec une baisse de son osmoconcentration, sans modification intracellulaire majeure.

Ainsi, le cheval déshydraté, par absence de sensation de soif, contrairement à un humain dans la même situation de déficit liquidien, ayant perdu encore plus d'électrolytes que d'eau, peut refuser de boire.

Or, comme souligné par BENAMOU-SMITH (7), tout état de déshydratation et donc de souffrance cellulaire, se traduit rapidement chez le cheval d'endurance, par l'apparition de :

- dysfonctionnements gastro-intestinaux (iléus, coliques ou diarrhées), par baisse de la perfusion intestinale ;

- tachycardie reflétant une absence de récupération cardiaque avec hausse délétère croissante en réponse à la chute du débit global ;

- dysfonctionnement musculaire (myosite, crampes), par défaut d'irrigation et d'apport de substrat ;

- dysfonctionnements nerveux, dont le flutter diaphragmatique est un reflet net ;

- dysfonctionnement rénal (IRA), par chute du débit glomérulaire ;

- atteinte cérébrale (démarche ébrieuse...), par anoxie ;

- chute globale des performances sportives : chez l'homme une déshydratation à hauteur de 1%, les fait chuter de 5%, or suite à une course le cheval peut subir une déshydratation de 4%...

Ces éléments, à la base de nombreuses éliminations en courses, découlent directement d'un mauvais taux d'hydratation. Il ressort ainsi, la nécessité d'évaluer avec précision cet état chez le cheval d'endurance en activité.

B. Outils et modifications hématologiques

15, 31, 48, 50, 60, 67

L'activité osmotique au sein des fluides corporels est globalement égale, et seule une petite différence de concentrations existe entre le plasma et les fluides interstitiels. Ainsi, il est aisé d'étudier l'hydratation corporelle par l'analyse de la composition sanguine des individus. On y observe alors plusieurs paramètres :

- Globules Rouges ou Erythrocytes

Ce sont chez le cheval, des cellules anucléées, à paroi déformable, dont la durée de vie est d'environ 90 jours après une érythropoïèse classique d'une semaine. Ce processus de renouvellement, variable en intensité, aboutit à des différences de valeurs globales selon l'âge, le sexe, la race et surtout l'activité musculaire propre à chaque individu.

Au cours de l'effort musculaire, le nombre de globules rouges est influencé directement par la concentration des catécholamines, donc par la durée et la vitesse de l'exercice. Ainsi, dès le début, afin d'augmenter rapidement la capacité d'oxygénation musculaire globale, la rate peut libérer jusqu'à l'équivalent de 50% des globules rouges totaux. Il y a ensuite une augmentation linéaire de l'hématocrite parallèle à celle de l'intensité de l'effort, et une hausse des capacités de travail aérobie.

Les globules rouges deviennent alors plus petits, mais le taux d'hémoglobine augmente. Ils résistent mieux au stress osmotique, tout en conservant leur déformabilité et leur morphologie habituelles. On note parfois la production d'échinocytes pendant l'effort, mais de manière minime.

Ainsi, dans le cadre de l'endurance, les globules rouges permettent indirectement l'évaluation précise des performances individuelles et leur évolution, par la mesure de l'hématocrite (Ht). Cette valeur correspond au rapport exprimé en %, du volume de sang occupé uniquement par ces globules rouges, sur le volume de sang total :

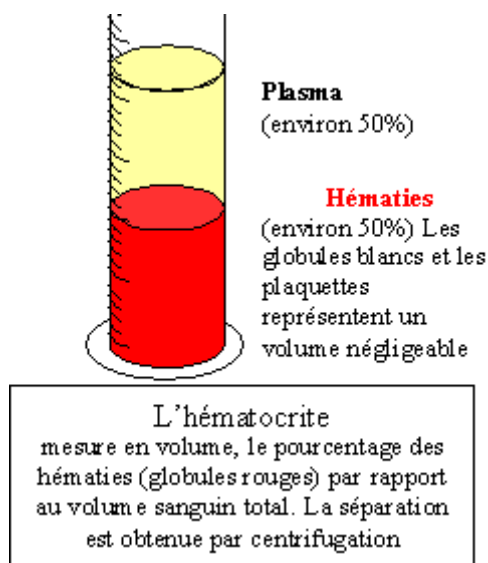
$Ht \text{ en } \% = \text{Volume occupé par les GR} / (\text{Volume occupé par les GR} + \text{Volume plasmatique})$

Un pourcentage élevé est directement corrélé à une efficacité accrue des transports sanguins de gaz. Les tissus, principalement musculaires, correctement approvisionnés en dioxygène voient leur métabolisme aérobie s'exacerber. La voie anaérobie est limitée à son strict minimum. On évalue ainsi l'efficacité de production énergétique s'inscrivant dans la durée.

On réussit de plus, par le différentiel par rapport au sang total, à évaluer le volume plasmatique, reflet du volume de fluides extracellulaires.

De manière pratique, ces dosages sont réalisés à partir de sang veineux, placé par capillarité dans un tube à hématocrite fin. A la suite de sa centrifugation, le pourcentage est obtenu par simple lecture sur une échelle de valeurs. La valeur définitive est obtenue par lecture de la position occupée par la limite plasma/sang au sein du tube.

Figure 3 : Tube à hématocrite après centrifugation, d'après PREVEIRAUD (67)



- Protéines Plasmatiques

Elles sont présentes à une concentration d'environ 70 g par litre de sang. Elles se répartissent entre immunoglobulines et albumines. Ce sont ces dernières, majoritaires (40g par l), d'origine hépatique, qui assurent 80% de la pression oncotique, garantissant l'existence même de ce volume liquidien plasmatique.

On peut évaluer indirectement ce dernier, reflet de l'hydratation totale, par la mesure réfractométrique de la concentration plasmatique des protéines totales.

Le prélèvement se réalise par ponction veineuse, puis se poursuit par une centrifugation. On obtient la valeur définitive, par observation d'une goutte du plasma, lue à l'aide d'un réfractomètre.

Globalement, toute hausse de cette valeur signe une perte d'eau ou un processus inflammatoire avec une hausse spécifique du fibrinogène ; l'inverse reflète un gain d'eau ou une souffrance hépatique.

Il est bien évident que tout état pathologique entraîne d'autres modifications spécifiques, mais les chevaux étudiés ici sont considérés comme sains, leur état de santé leur permettant de participer à des courses pour le moins éprouvantes et incompatibles avec des déficiences organiques poussées.

- Urée

Ce déchet azoté issu de remaniements intrahépatiques complexes est un paramètre sanguin caractéristique du fonctionnement rénal.

A l'état physiologique, 40 à 50% de l'urée filtrée au niveau rénal, est réabsorbée (principalement au niveau du tubule proximal), en parallèle avec la réabsorption d'eau et de sodium.

Ainsi, en mesurant sa concentration, on évalue également l'hydratation corporelle globale, et l'état du volume plasmatique, tant le pouvoir osmotique de cette molécule est élevé.

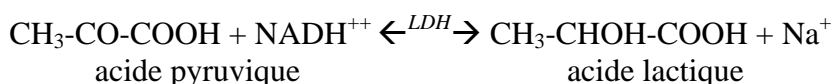
- Créatinine

Issue du muscle squelettique et non réabsorbée par le tubule rénal, elle est un témoin plus fiable du débit de filtration glomérulaire.

Dans le cadre d'études de l'état d'hydratation corporelle, on met fréquemment ces deux derniers paramètres en association par le biais d'un rapport [Urée] / [Créatinine] plasmatique. La valeur de référence étant 50, toute hausse (processus pathologique exclu) signe une hypovolémie, synonyme de déshydratation.

- Acide Lactique

Par la glycolyse, une mole de glucose est dégradée en deux moles d'acide pyruvique, dont le devenir est alternatif. Une partie est oxydée au cours du cycle de Krebs dans des conditions aérobies. L'autre partie est transformée en acide lactique sous le contrôle de la lactate déshydrogénase (LDH). Cette réaction réversible implique un transfert de protons des transporteurs NADH au substrat :



Cette réaction d'oxydo-réduction est catalysée par la LDH, dont l'isoenzyme M prédomine dans les muscles squelettiques.

Au pH de l'organisme, l'acide lactique se trouve presque complètement dissocié en ions lactate et H⁺. Une fois produit, l'organisme doit rapidement l'éliminer, par plusieurs mécanismes générateurs d'énergie :

- par sa transformation en glucose ou glycogène (néoglucogenèse), au niveau du foie ;
- par oxydation du pyruvate au sein des muscles et du myocarde, réaction inverse à la précédente, catalysée par l'isoenzyme LDH ;
- le reste est excréte principalement par le rein, plus accessoirement par la sueur.

A tout moment, la masse totale de lactate dans le sang traduit la combinaison des deux processus : apparition (production musculaire et transfert) et disparition (métabolisation et excréte). Toute variation de la lactatémie sanguine témoigne alors d'une rupture d'équilibre entre ces derniers. L'élévation de son taux au cours de l'effort traduit un déficit de l'organisme à le dégrader suffisamment rapidement.

Cette accumulation d'acide lactique dans le sang, longtemps appréhendée comme résultante directe et unique d'un déficit en oxygène au sein de la cellule musculaire, est encore actuellement discutée. Le rôle de l'hypoxie dans l'augmentation du taux de lactate sanguin est contesté au profit d'une simple différence physiologique entre les vitesses de transformation de l'énergie par les filières anaérobie et aérobie, selon POORTMANS (66).

Cette divergence intellectuelle croissante, s'ajoute à un protocole de prélèvement/dosage (conservation dans la glace, centrifugation très rapide, variation des résultats selon le site de ponction...) peu compatible avec les conditions réelles de terrain (justifiant l'utilité de notre étude), ainsi qu'à de nombreuses influences internes (captation imprévisible par différents organes au cours de l'effort, avec possible oxydation...) et externes (condition physique, type d'effort...) imprévisibles, conduisant à écarter la lactatémie comme témoin fiable de performance du cheval d'endurance.

- Ammoniaque

L'ammoniaque est un constituant azoté non protéique du sang. Son origine est double. Il peut être d'origine intestinale, dû à la dégradation des bactéries par les enzymes intestinales ; il provient également de la désamination rénale des acides aminés, principalement de la glutamine. Il est métabolisé en partie au niveau du foie, où il se transforme en urée (dépourvue de toxicité). Son élimination est urinaire. Ceci correspond à la situation rencontrée physiologiquement. Le risque majeur dans le cas du cheval d'endurance est une intoxication par apport alimentaire protéique excessif. Les besoins de l'athlète d'endurance sont majorés par l'effort : destruction musculaire, utilisation des acides aminés comme source d'énergie, synthèse de molécules protéiques impliquées dans la contraction musculaire (enzymes, canaux membranaires...). S'arrêtant à ce constat, nombre de régimes apportés actuellement aux chevaux d'endurance sont hyperprotéiques et conduisent à une augmentation excessive de l'ammoniémie sanguine, génératrice de souffrances multiples et plus particulièrement cérébrales. Cette intoxication de type chronique est facilement objectivable par dosage sanguin et par une réévaluation globale de la ration protéique apportée au cheval. Ce type de travail ne fait pas l'objet de notre étude, mais méritait par sa fréquence d'être mentionné.

L'ammoniaque ou l'allantoïne, témoignent également du passage en anaérobiose de l'organisme. Ils sont alors évalués par dosages colorimétriques simples, mais ceci est rarement réalisé, ce qui est regrettable, car jouissant d'un rôle de signal d'alarme efficace. En effet, la capacité de détoxification intracérébrale rapide du sang de ces deux substances, peut conduire en cas d'insuffisance, à des incoordinations importantes. En observant le délai d'apparition de celles-ci, on peut évaluer la capacité de résistance à l'effort de longue durée d'un sujet.

En s'entraînant, le cheval réussit à mieux gérer ces déchets, les réduisant à un niveau non générateur de symptômes nerveux. Cette valeur seuil, variable est sans cesse améliorée par un travail progressif du cheval d'endurance. La réapparition de l'un de ces signes (convulsion, coma, incoordination) signant directement à l'inverse un excès dans le type de travail imposé.

- Référence

Les différentes valeurs obtenues expérimentalement seront alors comparées à la composition de référence de FELDMAN *et al.* (32) :

Volume sanguin total=75 à 90 ml/kg de Poids Vif

Hématocrite=42%

Pour 100ml de sang complet :

- 78g d'eau
- 11 g de Hémoglobine
- 280 mg de Chlore
- 200 mg de Sodium
- 170 mg de Potassium
- 58 mg de Fer
- 55 mg de glucose
- 27 mg de Protéines Totales
- 14 mg de Lactate
- 4 mg de Calcium

Ainsi, on observe la multiplicité des outils (urée, créatinine, hémocrite, protéines totales, lactate et ammoniac) dont dispose le physiologiste pour évaluer l'hydratation globale du cheval, par le simple biais d'une prise de sang. Compte-tenu des contraintes imposées par le terrain, les dosages d'hémocrite et des protéines totales sont les paramètres retenus majoritairement.

N.B : Les aspects du métabolisme énergétique, peu différents de ceux concernant les chevaux d'effort rapide ne feront pas l'objet d'une étude.

C. Aspect expérimental

4, 5, 23, 31, 35, 36, 40, 57, 60, 69, 72

En utilisant des paramètres hématologiques simples (Ht, PT...), de nombreuses études se sont intéressées à l'hydratation du cheval d'endurance, facteur limitant principal dans cette discipline, en l'évaluant au cours de différents protocoles expérimentaux. Ces études sont réalisées sur des durées relativement longues, afin de dégager une réelle évolution «endurance induite», augmentant de même leur coût et limitant ainsi souvent leur nombre.

CARLSON et MASMANN (15), étudièrent 19 chevaux arabes, de 5 ans et plus, entraînés depuis 3 à 5 mois à l'endurance. Ils effectuèrent des prises de sang avant, pendant et après une course de 100 miles, en prenant hémocrite et protéines totales comme références du taux d'hydratation des chevaux. Les résultats obtenus mirent alors en évidence des hémocrites de valeurs stables, contrairement aux observations faisant suite à des travaux musculaires violents, et constamment inférieures à celle de la population de chevaux non entraînés servant de référence.

CARLSON (16) complète ces premiers travaux en étudiant l'évolution de ces premières valeurs après 6 mois d'un entraînement rigoureusement tourné vers l'endurance (50 à 150 miles par semaine). Il obtient alors une baisse significative des hémocrites avec passage de la valeur moyenne de 47% à 32%, tout en conservant des concentrations en protéines stables.

ROSE et HODGSON (46), publient les résultats d'une étude reposant sur l'évaluation de paramètres hématologiques de 11 chevaux subissant 12 semaines d'entraînement à des efforts d'intensité sub-maximale. Ils observent alors peu de variation des valeurs d'hémocrite, avec tout de même une légère décroissance, tant que les efforts restent du type endurance, et une hausse globale du volume plasmatique.

Puis complètent cette étude par d'autres travaux s'intéressant à 14 chevaux courant sur 160 kilomètres. Il les répartit en deux groupes : 7 constituent le groupe rapide avec des vitesses comprises entre 70 et 234 mètres par minute et 7 autres le groupe lent évoluant à des vitesses moindres. Les prises de sang réalisées avant la course, à l'arrivée, 30 minutes après et le lendemain, révèlent une augmentation des hémocrites du groupe rapide, ne persistant pas le lendemain. Ceci n'est que le reflet de l'action de la splénocontraction induite par le stress au cours des efforts musculaires brefs et intenses.

A l'inverse, les chevaux du groupe lent, dont le travail est sensiblement celui de chevaux d'endurance efficaces, n'ont pas d'évolution notable de leur hémocrite.

Ainsi, l'hémocrite des chevaux d'endurance, de valeur toujours initialement supérieure à celle observée chez les chevaux de courses, tend à décroître au fur et à mesure des progrès de l'athlète.

MAC KEEVER *et al.* (57) publient les résultats d'une étude s'intéressant à l'évolution du volume liquidien, induite par l'exercice chez le cheval. Six chevaux adultes (4 hongres et 2 étalons) de 16 mois à 4 ans, de conditions sensiblement identiques sont mis à l'entraînement de manière précisément dirigée vers l'endurance durant cinq semaines. Il ressort alors une nette augmentation du volume plasmatique et des modifications de la clairance rénale des différents électrolytes, dont celle du sodium qui augmente. Ainsi, on note le rôle secondaire de ce dernier dans le phénomène d'hypervolémie induite par l'entraînement, puisque son comportement rénal ne correspond pas à celui du volume liquidien global. Ce phénomène mettant bien en évidence l'existence d'une autre substance de pouvoir osmotique accru dans le cadre de l'état d'hydratation chez le cheval d'endurance.

MARTINEZ et SCAGLIONE (60), par des prélèvements réalisés sur 10 chevaux au départ, puis à 22 et 42 kilomètres de course, mettent en évidence l'existence d'une élévation transitoire des hématocrites, protéines totales, créatinine et de l'osmolarité plasmatique en début de course, mais de persistance limitée. Ils observent alors, passée la hausse transitoire due au stress, une baisse significative de l'hématocrite, compatible avec une hausse globale de volume plasmatique.

Des vétérinaires polonais en 2001 confirment par leurs travaux sur des chevaux parcourant 80, 120 et 160 kilomètres, que les changements hématologiques (Ht, PT, glucose, lactate et CK) observés avant 80 kilomètres et suivant le profil classique d'un effort sportif violent, ne sont que transitoires et disparaissent à 160 kilomètres.

Ainsi, à la vue de ces différentes études, on constate l'existence de deux phénomènes distincts :

- une communauté des résultats entre cheval d'endurance et de sprint, à l'échelle d'une course ponctuelle (hausse classique et transitoire de l'hématocrite) reflet de la déshydratation associée à l'effort, mais surtout de la splénocontraction due à l'effort.

- une singularité remarquable du cheval d'endurance, par rapport au sprinter, concernant les valeurs d'hématocrites, protéines totales et les concentrations sanguines globales, qui chutent à long terme, malgré une concentration en hémoglobine stable. Ceci reflète une hausse de volume plasmatique dans laquelle le sodium joue un rôle secondaire en comparaison avec celui qu'il occupe chez d'autres espèces.

Ces différents éléments participent à une meilleure résistance de l'organisme du cheval d'endurance face à la déshydratation.

Afin de diriger au mieux l'entraînement du futur cheval d'endurance, il convient donc de rechercher les mécanismes précis qui sous-tendent ces résultats singuliers.

D. Mécanismes physiologiques adaptatifs

6, 9, 13, 15, 28, 34, 35, 40, 41, 43, 45, 59, 60, 62, 63, 67, 69, 72

Partis de ces constatations expérimentales, différents auteurs ont analysé cette adaptation du cheval à l'effort d'endurance. Ce phénomène concerne principalement la lutte face à la déshydratation associée à une oxygénation tissulaire optimale.

a. Oxygénation tissulaire

Tout effort musculaire engendre, au minimum à ses débuts, une hypoxie. L'organisme réagit en augmentant la concentration en 2-3 DPG au sein des globules rouges. Le 2-3 DPG est un produit de dégradation du glucose aux dépens de la formation d'ATP, avec consommation de NADPH. Il se fixe sur l'hémoglobine et la stabilise, occupant le site de fixation du dioxygène sur la molécule d'hémoglobine. Sa présence facilite alors la libération d'oxygène au niveau du site de production du 2-3 DPG, c'est à dire au sein des tissus musculaires sollicités. Cette précision extrême de la distribution en dioxygène permet un rendement optimal de son utilisation.

Au fur et à mesure de l'entraînement, on constate chez le cheval d'endurance une baisse de son taux global de 2-3 DPG. Ainsi, on peut évaluer la qualité d'un entraînement, par dosage répété de ce composé et évaluation de sa décroissance synonyme d'une meilleure gestion dans la libération tissulaire locale du dioxygène.

L'hypoxie stimule de même la production d'érythropoïétine, génératrice d'une stimulation de la production d'hémoglobine et donc du nombre de globules rouges. La traduction au niveau des valeurs d'hématocrites varie pourtant entre le cheval de courses et d'endurance.

En effet, chez ce dernier, comme en témoignent les études précédentes, on observe une augmentation transitoire des valeurs d'hématocrite lors de courses, qui s'efface puis s'inverse au fur et à mesure de ses progrès en entraînement.

Au cours d'une course d'endurance, le nombre d'érythrocytes riches en hémoglobine fonctionnelle, croît sous l'influence de l'EPO et de facteurs de stress classiques. Cette hausse se minimise pourtant, lorsqu'on l'évalue par le biais de l'hématocrite qui lui baisse à l'échelle de l'entraînement global, sous entendant une modification du volume plasmatique.

b. Lutte contre la déshydratation

Même si le nombre de globules rouges tend à augmenter, la seule étude de l'hématocrite, en rapportant ce nombre au volume plasmatique total, révèle de toutes autres données. A cela, une thèse confirmée par l'étude de paramètres moins labiles et perturbés par le stress que sont les concentrations en urée, protéines totales et créatinine, qui baissent dans leur globalité : la hausse du volume plasmatique.

Comme le confirme BENAMOU-SMITH (7), la thermorégulation et plus globalement la lutte contre la déshydratation, sont des adaptations fondamentales de l'effort d'endurance.

Les pertes liquidiennes étant très importantes du fait de l'intensité des réactions métaboliques et des pertes incompressibles (respiration, transpiration...), et de la discontinuité des apports possibles, le cheval doit trouver les ressources en lui-même, ce qui passe par une augmentation de son volume plasmatique global.

C'est ce paramètre de résistance, assurant une composition liquidienne organique stable, qui permet d'éviter les principales affections métaboliques rencontrées lors des compétitions : crampes, coliques...

Au cours de l'effort d'endurance, selon HINCLIFF *et al.* (42), la contrainte étant sub-maximale, les effets du système nerveux sympathique sont mineurs. Or, c'est le sympathique qui modifie de manière majeure le flux sanguin rénal et favorise la sécrétion de rénine. Cette dernière active la formation d'angiotensine II, induisant une sécrétion d'aldostérone qui stimule la réabsorption de chlorure de sodium et donc d'eau. Cette minoration de l'importance du fonctionnement sympathique signe donc le rôle secondaire du chlorure de sodium dans l'équilibre liquidien global du cheval d'endurance.

Ainsi, comme le suggère l'étude publiée par MAC KEEVER *et al.* (57), le maintien de la volémie du cheval d'endurance fait certes appel à la réabsorption d'eau au niveau rénal, mais par le biais d'une substance osmotiquement plus active que le sodium. Ce travail confirmé par celui de BARTON (5), révélant des taux de filtration glomérulaire et d'évacuation du sodium inchangés au cours de la progression des chevaux à l'entraînement.

La substance primordiale dans cette hypervolémie a été identifiée au cours de l'étude de MAC KEEVER *et al.* (57) en 1987 : il s'agit de l'urée. Le cheval d'endurance réabsorbe en effet à l'exemple du chien ou de l'homme, une quantité accrue d'eau libre au niveau rénal, au cours de l'effort, mais par le biais de substances osmotiquement actives autres que le sodium, dont l'urée est le chef de file.

Ainsi, afin de garantir de manière plus stable son état d'hydratation, le cheval d'endurance en conservant une concentration continuellement élevée en urée, se constitue ainsi une réserve osmotique permanente.

Or, chez les mammifères, il n'existe pas de mécanisme de réabsorption active de l'urée ; ce sont les changements du taux de filtration glomérulaire ou la concentration plasmatique de l'urée, qui vont modifier son propre taux d'excrétion.

Pour contrecarrer cela, le cheval d'endurance met alors en place une régulation conjointe de la production et de la dégradation de cette substance primordiale, dont la finesse s'accroît avec le niveau d'entraînement. L'hypothèse la plus probable à ce jour, est un équilibre constant entre une hydrolyse caecale de cette urée sanguine en cas d'excès avec utilisation comme matière première dans des synthèses protéiques nouvelles diverses, et sa resynthèse par cette même population caecale à partir des acides aminés, en cas de chute de la concentration sanguine.

On observe donc ici un rôle supplémentaire unique et primordial du caecum dans l'espèce équine, ouvrant de nouvelles voies à l'entraînement du cheval d'endurance, impliquant plus que jamais son aspect alimentaire.

Afin de lutter contre la déshydratation inhérente à l'effort d'endurance, le cheval maintient et même augmente son volume plasmatique circulant. Pour cela, il utilise l'urée en tant que substance osmotiquement active, ce qui nécessite une population bactérienne caecale adaptée. Cette préférence de synthèse bactérienne est réelle, et doit conduire à intégrer l'alimentation dans la stratégie globale d'entraînement du cheval.

III. Etat actuel des connaissances et optimisation des performances

Initialement bercé de nombreuses connaissances empiriques plus ou moins judicieusement interprétées, l'entraînement sportif du cheval d'endurance, revêt actuellement un tout autre aspect.

En effet, depuis maintenant plusieurs dizaines d'années, les résultats obtenus par les marathoniens humains et leurs réactions singulières au cours de leur préparation physique, servent plus ou moins judicieusement à l'entraînement du cheval d'endurance actuel. VILLIGER *et al.* (76), présentent ces derniers dans leur ouvrage de 1992.

De manière schématique, cette période primordiale se répartit en trois aspects clefs :

A. Aspect athlétique

Ce premier domaine très complexe, bien défini en 2003 à Montpellier par le Dr J-L LECLERC (53), vétérinaire de l'équipe nationale, nécessite d'être divisé en phase d'adaptations différentes de prime abord, mais en réalité totalement interdépendantes :

a. Adaptation mentale

Celle-ci, longtemps occultée, est enfin reconnue comme élément central dans toutes les disciplines équestres et encore plus en endurance. Elle vise à minimiser progressivement l'importance donnée à l'instinct grégaire du cheval, incompatible avec les situations de courses futures auxquelles il sera soumis.

Cette adaptation cherche également à annuler la connotation de fuite et donc de situation de panique génératrice de stress très dispendieuse en énergie, que possède initialement le galop pour le cheval.

On tend vers une annulation des réactions de panique automatisée, face aux situations de nouveautés ou d'inconnu. « On habitue à l'inhabituel. »

Cette adaptation mentale primordiale, au vu des objectifs ambitieux qu'elle fixe, ne peut se réaliser qu'au cours d'un travail patient et progressif, ce qui nécessite une mise en place très précoce dans la stratégie préparatoire globale.

Cette adaptation correspond à une habitude par mise en confiance progressive du cheval.

Ce n'est qu'une fois cette confiance instaurée, que peut réellement débiter le travail musculaire.

b. Adaptation musculaire

Cette préparation comporte bien évidemment une part importante de travail en milieu extérieur, propice à l'approche des conditions futures de courses, mais pas exclusivement.

En effet, loin de n'être qu'une succession de ballades champêtres de durées croissantes, le travail du cheval d'endurance doit réserver une place non négligeable à l'entraînement en manège. Celui-ci permet le renfort de l'harmonie entre le cavalier et sa monture, tout en faisant progresser l'équilibre et la souplesse de leurs évolutions, par le développement spécifique de la musculature.

Celle-ci doit obtenir progressivement une extension raisonnée, mais nette de la ligne du dessus, base de toute locomotion efficace, harmonieuse et donc peu consommatrice d'énergie.

L'adaptation musculaire vise à faire acquérir une locomotion équilibrée et donc économe en énergie.

Ce travail musculaire global très exigeant, nécessite une adaptation métabolique concomitante qu'il faut dès le début diriger en conséquence, c'est-à-dire vers un travail à long terme.

c. Endurance métabolique

- Objectifs

Soumis aux nombreuses contraintes présentées précédemment, l'organisme du cheval d'endurance doit pouvoir lutter efficacement contre les modifications liquidiennes incessantes et importantes qu'il subit. En effet, tout basculement notoire de la situation d'équilibre mène rapidement à des situations néfastes, voire pathologiques, incompatibles avec toute poursuite de l'effort. Ainsi, l'entraînement doit améliorer la perfusion générale de l'organisme et sa volémie globale.

Par une meilleure perfusion générale, les processus de thermorégulation, digestion et locomotion, coexistent et évoluent sans jamais se dominer. L'organisme peut ainsi gérer au mieux l'effort sportif qui se poursuit harmonieusement.

On observe encore à ce niveau, que l'une des clefs de l'endurance est l'obtention de l'équilibre organique ; c'est un travail sur l'harmonie générale du cheval et non sur la dominance d'un aspect particulier au détriment d'autres, comme c'est le cas dans d'autres disciplines.

- Techniques

Afin de tendre vers cet équilibre, il faut adapter l'effort à chaque cheval, à son environnement et à son mental : il n'y a pas de « recette miracle », il n'y a que des pistes dont la judicieuse combinaison peut mener à des miracles !

Pour respecter le délai physiologique d'adaptation du cheval à l'effort demandé, on ne commence jamais la phase d'endurance métabolique avant une durée initiale d'activité de 2 ans, sous peine de « casser définitivement » l'athlète en devenir.

Le travail est principalement axé sur du pas actif, mais avec, et ce qui fait l'une des principales particularités de l'endurance, l'apparition de dénivelés croissants. Une fois cette phase suffisamment répétée, on intègre alors progressivement des périodes de 10 à 15 minutes de trot sur terrain plat, puis plus tard, afin de minimiser tout risque de souffrance articulaire, sur terrain varié.

Enfin, uniquement lorsque le cheval par sa souplesse et sa bonne récupération, parvient à gérer parfaitement ce type d'efforts, on pourra insérer quelques phases de galop lent.

Ces séances de compositions variées, se déroulent sur 1 heure 30 (durée minimale pour développer une adaptation physiologique durable), à 3 heures (la limite maximale génératrice de dégoût durable du cheval face à l'effort en cas de dépassement). On les réalise à la fréquence de quatre par semaine, lors de période d'entraînement actif, en descendant à trois en entretien. On évitera catégoriquement tout entraînement de type fractionné, à la base d'un renfort non négligeable de la connotation de fuite et de situation de panique attribuée naturellement par le cheval au galop. Afin d'optimiser encore cela, on loge préférentiellement le cheval en extérieur.

Progressivement on obtient un cheval dont l'équilibre métabolique se construit sans cesse en fonction de son environnement.

Une fois cette phase réussie, on se trouve déjà avec un très bon cheval d'endurance, prêt à aborder sereinement les différents niveaux de courses qui lui sont proposés. C'est seulement ensuite, vers l'âge de sept ans, que l'on peut espérer passer au stade supérieur, conditionnant la participation à des épreuves de haut niveau.

d. Endurance résistance

- Objectifs

Après avoir réussi à faire intégrer au cheval la notion de durée, le travail en résistance apprend la notion de vitesse, conduisant le cheval à aller plus vite, plus loin.

Au cours de ce travail, on recherche un galop souple, relâché, aux allures rasantes, dans lequel le cheval économise l'amplitude donnée à ses gestes, optimisant l'efficacité de sa locomotion, tout en développant ses capacités de récupération. D'abord guidé par son cavalier, le cheval de haut niveau, adopte ensuite lui-même ce galop lent, long et régulier.

- Techniques

Ce travail se réalise de préférence sur un terrain plat, souple et très vaste : hippodrome, plage... On réalise alors principalement une phase de 1 heure 30 de galop, puis on arrête le cheval, on analyse son état par un contrôle vétérinaire semblable à ceux réalisés en course (nommé Vet gate), puis on repart sur 1 heure 30 de galop lent (300 m par minute).

Ensuite, on laisse le cheval six jours au repos, afin de lui permettre une récupération optimale et indispensable à la mise en place des différentes réponses physiologiques adaptatives à l'effort réalisé. Dans le calendrier global, on place cette séance de rythme mensuel, trois semaines environ avant toute grande épreuve, afin d'espérer en obtenir les meilleurs bénéfices.

L'entraînement du cheval d'endurance, loin de pousser le cheval brusquement en situation de détresse organique et donc de stress, comme c'est le cas dans l'entraînement aux courses de sprint, doit au contraire limiter celui-ci, pour que les conditions optimales à l'effort puissent se mettre en place. On place fréquemment le cheval dans le rouge afin de lui éviter tout passage dans le rouge. L'endurance vise ainsi à obtenir et à maintenir au mieux l'état d'équilibre du cheval, afin de faire perdurer la performance.

Quoique primordial, l'aspect athlétique de la préparation du cheval d'endurance ne saurait se concevoir sans une préparation diététique mûrement réfléchie.

B.Aspect diététique

Aspect clairement développé par BENAMOU-SMITH (8) et WOLTER (78).

a. Rappels de physiologie digestive

Le cheval, herbivore non ruminant, cumule les avantages d'une digestion enzymatique de type monogastrique, puis d'une digestion microbienne de type polygastrique :

- La première, lui permet d'obtenir le meilleur rendement des apports en protéines de qualité, en glucides facilement digestibles, en matières grasses, en minéraux et en vitamines. Elle est à la base depuis de longues années du volet «énergétique strict» de l'apport alimentaire du cheval d'endurance, visant une mise en place de réserves lipidiques facilement mobilisables au cours de l'effort.

- La seconde lui offre surtout la possibilité de tirer parti des aliments cellulosiques et d'un certain recyclage de l'azote, mais reste tributaire d'un approvisionnement alimentaire en acides aminés indispensables.

Cette digestion microbienne intestino-caecale protéique particulière, encore sous exploitée mérite que l'on s'y intéresse particulièrement, tant l'urée est primordiale pour le cheval d'endurance.

b. Recommandations diététiques actuelles

- Les glucides

La cellulose est une très médiocre source énergétique, d'autant plus qu'elle est davantage polymérisée et lignifiée. Moins bien digérée que l'extractif non azoté, elle n'aboutit qu'à des acides gras volatils qui ont un bas rendement énergétique, même s'ils n'exposent pas à des troubles céto-siques. Peu intéressante en terme de performance, **elle est toutefois conservée à un taux minimal de 15 à 18% de la ration** afin de stimuler le transit digestif dans le gros intestin et de prévenir ainsi stases et dysmicrobismes à l'origine de coliques, auto-intoxication et autres troubles plus ou moins graves.

L'amidon, dont la place est prédominante dans l'alimentation du marathonien humain, est aussi très employé chez le cheval. Il constitue **la source énergétique principale chez le cheval de sport**, sous forme de céréales (notamment d'avoine), dont la proportion dans la ration augmente avec la quantité de travail, alors que régresse la part de fourrages. On observe toutefois des limites à son utilisation :

- Une limite digestive, due à l'activité amylasique restreinte chez le cheval, qui est rapidement dépassée en cas d'apport brutal, abondant ou peu fractionné. Le cheval en travail intense est alors exposé à des troubles digestifs, à une auto-intoxication par l'acide lactique, les amines et les endotoxines ; il en résulte une surcharge hépatique qui nuit fortement à la forme sportive. Ces risques connus sont minimisés par un fractionnement important de la ration (3 à 4 repas de concentrés par jour chez le cheval en travail intense) ainsi que le traitement mécanique des matières premières (floconnage, broyage...), permettant de régulariser le transit digestif, tout en facilitant la digestion.

- Une limite métabolique, représentée par le risque d'un stockage exagéré de glycogène musculaire privilégiant son catabolisme anaérobie et donc une surproduction d'acide lactique potentiellement délétère. Afin de minimiser ce second risque, on évite les surcharges glycogéniques du muscle, en particulier chez les chevaux hypernerveux, en équilibrant précisément l'apport glucidique avec le travail musculaire demandé.

En prévision de l'épuisement des réserves musculaires en glycogène, il est beaucoup plus judicieux de renforcer la part lipidique de la ration du cheval.

- Les lipides

Les lipides sont reconnus comme source énergétique préférentielle pour les épreuves d'endurance en aérobiose. Ils cumulent les avantages d'une bonne acceptabilité et d'une haute digestibilité, tout en évitant une gêne de la population bactérienne physiologique. En outre, ils ont le mérite d'une forte concentration énergétique (2,25 fois plus que les protéides ou l'extractif non azoté) et sont susceptibles d'améliorer les performances du cheval d'endurance par l'épargne du glycogène musculaire et la stabilité accrue de la glycémie qu'ils induisent.

De manière spécifique, les acides gras à chaîne moyenne sont préférentiellement apportés. Plus facilement digérés, même en cas d'insuffisance biliaire (d'où de moindres pertes fécales de calcium et de magnésium), ils sont aussi plus facilement transportés dans l'organisme (sans risque de stéatose hépatique) et préférentiellement métabolisés sans exiger la disposition de carnitine, qui se révèle indispensable au transfert intramitochondrial des acides gras plus longs.

De même, les acides gras essentiels constitutifs des membranes biologiques, dont la polyinsaturation augmente la perméabilité membranaire et par là, l'intensité du métabolisme énergétique et les aptitudes sportives, sont spécifiquement utilisées.

En pratique, cela aboutit, en prenant en compte le risque d'hypomagnésémie favorisée par les régimes hypergras, **à plafonner le taux lipidique de la ration à des maxima de l'ordre de 12%** pour le cheval d'endurance (contre 5 à 7% pour le cheval de sprint) avec une complémentation minérale adaptée. Ces apports sous forme d'huiles végétales (maïs, tournesol) avec une part éventuelle de dérivés gras du poisson, sont introduits progressivement en ménageant une transition de une à deux semaines sur le plan digestif, mais de un à deux mois sur le plan métabolique.

- Les protéines

Par lui-même, le travail musculaire modifie assez peu le niveau des besoins protéiques, et préserve au maximum les protéines tissulaires. Dans la mesure où il est modéré, il tend à élever la rétention azotée. Au contraire, s'il est très intense ou très prolongé, il renforce le catabolisme azoté.

De manière théorique, le taux protéique de la ration pourrait s'abaisser au fur et à mesure que progressent les besoins énergétiques ; cependant une sub-carence protéique favorise l'apparition de «l'anémie du sportif». Or, l'activité physique entraîne une usure accrue de la machine animale, qui induit vraisemblablement quelques hausses des besoins azotés. Cette sub-carence est encore plus marquée au début de l'entraînement lors de la mise en muscle, mais également lorsque l'entraînement ou la tension psychologique de la compétition sont générateurs de stress.

Il faut également éviter les excès azotés, comme énoncé dans le chapitre consacré à l'ammoniaque et à son dosage. Ils exposent à des dysmicrobismes putréfiants dans le gros intestin, donc à un risque d'auto-intoxication. En effet, les surcharges azotées élèvent excessivement l'ammoniémie, exagèrent la sudation, augmentent la diurèse et donc les besoins hydriques, ce qui met en péril les performances sportives. Ainsi, **on limitera à 11% la part protéique de la ration du cheval d'endurance.**

- Les minéraux

Le chlorure de sodium exporté en abondance par la sudation, doit être apporté à hauteur de 50 à 70 grammes par jour en entretien, avec complémentation en course toutes les deux heures idéalement, afin de lutter au mieux contre la fatigue et les lésions musculaires.

Le calcium et le magnésium sont eux aussi rehaussés par rapport à une ration classique, avec des taux allant jusqu'à 0.7 à 0.8 % pour le calcium et 0.1 à 0.15% de la ration pour le magnésium. De manière globale, les oligo-éléments voient leurs apports doubler. On augmente ainsi les marges de sécurité inhérentes à la baisse de leur taux d'assimilation au cours de l'effort et à la progression de la concentration énergétique de la ration.

Etant donné le manque de consensus actuel au sujet des apports minéraux essentiels, il convient de ne pas rechercher une précision extrême, mais d'éviter l'apparition de troubles par un apport global majoré par rapport aux rations classiques, à l'aide de formulations galéniques propres à chaque cheval.

Au delà, de ces données quantitatives actuellement bien intégrées, c'est l'aspect qualitatif qui va permettre de grandes évolutions. En effet, à partir de ces recommandations globales de composition des rations, et au regard du rôle primordial occupé par l'urée, il est nécessaire de repenser la place des différents constituants. Il convient de chercher à identifier les populations bactériennes ou les phénomènes chimiques spécifiquement rattachés à cette substance régulatrice. Cela permettra de mettre en place par la suite les moyens favorables au développement de leurs conditions optimales de fonctionnement (utilisation de pro-biotiques, régulateur de pH...).

La caractéristique majeure qui ressort des recommandations d'entraînement du cheval d'endurance, est son inscription dans la durée. En effet, athlétiquement, mais aussi diététiquement, la progression du cheval ne peut s'obtenir qu'en visant un état d'équilibre obtenu graduellement. Les efforts sportifs couplés à des préparations mentale et diététique poussées visent à adapter le cheval à son environnement, non à lui imposer. Soustrait à cette contrainte, la démarche devient beaucoup plus profitable, car non totalement subie. Afin de soutenir cette progression, on veillera principalement à un apport hydro-électrique régulier, indispensable à une minimisation des risques de déshydratation, talon d'Achille des chevaux les plus volontaires.

Rapport-gratuit.com 
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

C. Aspect hydro-électrolytique

a. Exercice et déshydratation

L'exercice prolongé, surtout dans des conditions de température et d'humidité importantes, induit de fortes pertes de fluides. Ce déficit liquidien limite la thermorégulation et les fonctions cardiovasculaires du cheval. Dans le cas précis d'un effort de type endurance, le développement et l'augmentation de ce phénomène de déshydratation, apparaît dans les premiers temps de l'effort, afin de maintenir la thermorégulation. Suite au rendement du travail musculaire brut aboutissant à une dissipation énergétique à 80 % sous forme de chaleur, ce phénomène physiologique primordial se voit dangereusement stoppé par la déshydratation dès que celle-ci atteint le stade des 10% selon JOHN *et al.*(50), seuil de passage vers l'hyperthermie aiguë.

Les fonctions cardiovasculaires sont également limitées par la déshydratation, ce que souligne BUONO *et al.*(13). L'organisme à l'effort doit maintenir un volume liquidien compatible avec une perfusion musculaire suffisante afin d'assurer les fonctions métaboliques cellulaires et la vasodilatation cutanée minimale requise pour dissiper la chaleur. En cas de déshydratation trop poussée, le volume effectif circulant est réduit, entraînant une baisse de perfusion des tissus périphériques (muscles et peau) au profit des organes et systèmes centraux. La réduction de dissipation de chaleur résultante est alors proportionnelle au degré de déshydratation.

En plus de cette perte liquidienne, la perte électrolytique est également substantielle. Les substances minérales sont indispensables aux fonctionnements systémiques (équilibre en eau des milieux intra et extracellulaires) et cellulaires (conduction nerveuse, dépolarisation musculaire...).

La chaleur induite à l'effort conduit à de fortes pertes hydriques mais également électrolytiques, rapidement délétères.

b. Détection et gestion

Majoritaire dans la partie débutante de l'effort d'endurance, la perte d'eau possède également une grande variabilité quantitative, selon les paramètres de courses : distance, vitesse, terrain, conditions climatiques et réponse individuelle de chaque cheval face à l'exercice.

Par exemple, un cheval d'endurance très entraîné sur des distances de 150 kilomètres par temps frais, en terrain facile, a de faibles pertes en eau et électrolytes. A l'autre extrême, si cette course se déroule sous la chaleur, en terrain accidenté, les pertes seront alors substantielles et un déficit peut alors apparaître.

Dans le premier cas, l'évacuation de chaleur se fait principalement par convection et radiation, l'évaporation en milieu frais ne nécessite que peu de fluides, à l'inverse du second cas.

La perte d'eau étant très variable selon la course, il est nécessaire de réaliser des mesures objectives de celle-ci, lors d'élaboration de conseils en réhydratation. Picard estime pour cela, qu'environ 15 litres d'eau sont dissipés au minimum par heure d'effort, pour évacuer la chaleur produite, avec une majoration possible sous des conditions extrêmes.

Des études montrent qu'en endurance cette perte est maximale à mi-course, allant jusqu'à 40 litres, soit 10 % du poids vif. Dans le cas général, cette perte est de 25 litres pour une course de 80 kilomètres, soit 6 % du poids vif.

Il est également important de ne pas sous estimer la vitesse d'installation de cette déshydratation, les premiers signes apparaissent à environ 4 % de degré de déshydratation, ce qui est atteignable en 1 heure chez le cheval d'endurance, selon BUONO (13). Si l'exercice perdure encore une heure, le cheval approche des 10 %, soit un degré sévère de déshydratation, à l'origine de nombreux troubles.

On comprend donc la nécessité d'un apport liquidien au minimum toutes les heures, sans jamais dépasser deux heures, comme recommandé par PICARD (65).

La sueur perdue est hypertonique par rapport au plasma, principalement par sa composition en ions chlore (174 mmol/L) et sodium (132 mmol/L), mais aussi potassium (53 mmol/L), et dans une moindre mesure magnésium (6 mmol/L) et calcium (5 mmol/L). Ainsi, en une heure, avec une perte d'environ 15 litres de sueur, un cheval d'endurance perd 2000, 800 et 2600 mmol de sodium, potassium et chlore, et 90 et 75 mmol de magnésium et calcium. Ces différents chiffres mettent en évidence les différents risques de troubles en cas de non complémentation en électrolytes (troubles osmotiques et cellulaires).

Malgré des études aux résultats contradictoires, il semble actuellement que les meilleurs résultats soient obtenus à l'aide d'une complémentation double :

- un apport de fluides hypotoniques parentéraux ou hypertoniques par voie orale, avant la course, aboutissant à une hyperhydratation (hausse du volume plasmatique, baisse de la fréquence cardiaque et de la température corporelle)

- un abreuvement aussi fréquent que possible en course, avec administration de pâtes d'électrolytes hypertoniques. Ces dernières limitent la « dilution » des électrolytes causée par la prise d'eau seule. La hausse de sodium plasmatique créée par ces pâtes génère un appel d'eau intestinal. Ce flux liquidien digestif stimulerait le réflexe de soif du cheval et ce, jusqu'à retour à une baisse d'osmolalité du fluide intestinal stoppant la prise de boisson.

Partant de ces données générales, il convient ensuite à chaque cavalier d'adapter au mieux la stratégie d'apport hydro-électrique selon les conditions de courses, à partir de ces bases :

- apport minimal toutes les 2 heures d'eau couplée à des électrolytes ;
- habitude progressive du cheval à la prise régulière de ces fluides oraux hypertoniques avant et pendant la course, afin de limiter tout stress lors de la prise et pour augmenter leur efficacité.

Les pertes hydro-électrolytiques causées par la chaleur inhérentes à l'effort, doivent être comblées rapidement au cours de la course, afin d'en limiter les effets délétères. Cette compensation est assurée par un apport liquidien fréquent, au minimum toutes les 2 heures, couplé à des électrolytes de composition et galénique adaptées à chaque cheval.

Afin d'obtenir une complémentation la plus efficace possible, il convient de connaître les pertes réelles subies lors des courses. Dans ce but, il convient d'en réaliser l'étude expérimentale sur le terrain, à l'aide de paramètres simples mais représentatifs, car adaptés à ces conditions singulières.

IV. Elaboration d'un protocole expérimental

A. Objectifs

Les connaissances actuelles déjà importantes en matière d'endurance équestre, ne sont pourtant pas suffisantes. La diversité de leurs sources mène rapidement à une satisfaction globale correcte, mais ne permet pas d'ajustement précis de l'entraînement du cheval. Les protocoles existants ne sauraient permettre l'acquisition de performances compatibles avec le potentiel réel de chaque individu.

Loin de viser une exhaustivité des connaissances, cette étude a pour but au contraire de les approfondir dans le cadre d'une population donnée, dans des conditions correspondant à celles observées majoritairement en France. C'est donc l'adéquation à la population d'endurance équine française qui sera recherchée ici. On limite ainsi le risque de non efficacité des protocoles d'entraînements actuels trop généralistes.

Malgré les difficultés temporelles et matérielles que ce genre de travail comporte, c'est sur le terrain que ce suivi sera assuré, afin d'en affiner toujours plus la représentativité. Pour cela, il nous faut trouver des paramètres hématobiochimiques simples, témoins fiables du niveau d'entraînement d'un cheval, et ce, afin de mieux :

- gérer l'entraînement ;
- gérer les courses à proprement parler ;
- gérer les mises au repos et déterminer la place à leurs accorder dans la saison, le tout correspondant aux conditions actuellement rencontrées par les chevaux impliqués en France dans cette discipline.

B. Matériels et méthodes

Le protocole sera défini en fonction des réalités pratiques et temporelles d'entraînement de la population. Afin de réaliser cela au mieux, divers éléments inter-dépendants seront étudiés et analysés :

- évolution de l'état d'hydratation immédiat et au cours de la saison par mesures hématologiques simples (Ht, PT, [urée] plasmatique), compatibles avec les conditions de terrain ;

- mise en relation de ces paramètres avec les états sportif et physiologique des chevaux, afin de vérifier sans cesse la cohérence des données ;

- liens avec la régie globale des chevaux (alimentation, logement, soins divers), afin d'écartier tout biais et recueillir toute information adjuvante ;

- comparaison et analyse des résultats au regard des travaux précédents, par soucis de validation définitive.

- Population

@ 22 (nombre minimal d'individus requis pour espérer obtenir des données statistiquement exploitables et extrapolables) chevaux résidant au sein du même centre d'entraînement afin d'assurer la standardisation d'un maximum de paramètres avec :

- 10 chevaux âgés de 6 ou 7 ans n'ayant encore jamais réalisé de CEN 2 étoiles : course de 125 km en vitesse libre avec un minimum de 12km/h (population « novice », recherche des effets directs de l'entraînement)

- 10 chevaux âgés de 8 ou 9 ans ayant déjà réalisé une saison ponctuée de CEN 2 étoiles (population « entraînée », recherche des progrès de l'entraînement)

- 1 cheval non soumis aux contraintes sportives de chaque catégorie sera pris comme témoin de référence.

@ Profil homogène : nombre d'engagements en courses proche, conduite d'entraînement progressive, races uniques ou très proches, filiation connue.

@ Régies sportives et alimentaires identiques et paramétrées

@ Sexes indifférents, mais absence d'activité reproductrice marquée et équilibre entre les différentes catégories (hongre, étalon, jument).

Cette population se définit donc par une uniformité et un profil global proche de celui observé en endurance française actuellement, ceci afin d'obtenir des résultats reproductibles et surtout extrapolables, donc utilisables en pratique.

- Protocole

@ Prélèvements (par vétérinaire) :

- ponction de la veine jugulaire ;
- le matin avant l'entraînement ou un jour de repos, à distance d'une course ou d'un effort majeur ;
- contention assurée par une personne familière (entraîneur, palefrenier ou propriétaire connu) ;
- matériel standard (vacutainer petit format, tube EDTA pour NF et hépariné pour biochimie, aiguille à usage unique).

Analyse immédiate sur le site d'Ht et PT à l'aide d'une centrifugeuse, de microtubes à hématocrite et d'un réfractomètre étalonnés. Envoi à un laboratoire proche des tubes pour réalisation des profils complets et le dosage de l'urée plasmatique. Ces différents éléments seront de caractéristiques parfaitement identiques au cours de la totalité du protocole.

@ Fiche de suivi individuel remplie par l'entraîneur du cheval, faisant ainsi ressortir des éléments du quotidien qui, échappant au regard ponctuel du vétérinaire, n'en sont pas moins primordiaux :

Fiche de suivi individuel

Nom :

Sexe :

Age :

Numéro : (attribué en début de protocole et porté sur les différents prélèvements)

Entraînement :

Date de début	Durée d'une séance	Fréquence	Allures	Type de terrain	Dénivelé	Conditions climatiques	Remarques

Compétitions :

Date	Type	Résultats	Remarques

Alimentation :

Période	Composition	Quantité	Rythme

Evènements majeurs médicaux ou non :

Date	Description	Remarques

@ Fiche de prélèvement remplie par le vétérinaire :

Fiche de prélèvement

Date :

Heure :

Identité du vétérinaire :

Lieu :

Nom :

Sexe :

Age :

Numéro :

Examen clinique :

- FC :

- FR :

- TRC

- Transit :

- MO :

- Pli de peau :

- Température rectale :

- Blessures :

- Jetage :

- Note d'état :

- Comportement, vigilance :

Examen locomoteur :

- Statique :

ferrure

tares ou blessures

- Dynamique sur terrain plat, régulier et ferme, au trot avec un mouvement libre de la tête , en ligne droite de 40 mètres, puis sur le cercle:

boiterie (grade, localisation et durée si chronique)

particularités

Prélèvements :

Type	Localisation	Résultat	Remarques

- Calendrier

Suivi individuel global tout au long de la saison, avec 5 séries de prélèvements :

@ initial : Profil hématologique complet en Février-Mars avant reprise de l'entraînement. Permet de servir de référence pour la suite du protocole et de détecter afin d'écartier le cas échéant tout animal non représentatif.

@ série 2 : Avril-Mai avant la première CEN 2 étoiles. Définit les premiers effets de l'entraînement, sans ajout de ceux dus au stress et conditions de la compétition.

@ série 3 : Juillet-Août (milieu de saison). Définit de manière plus fiable les effets de l'entraînement et ses interactions plus ou moins positives avec les échéances officielles, en rythme classique, car correspond à la mi-saison sous nos latitudes.

@ série 4 : Octobre-Novembre (fin de saison). Définit une sorte de bilan de la saison, correspondant donc à l'évaluation ultime des effets de l'entraînement sur le cheval dont l'état de fatigue correspond alors à son maximum au regard de sa saison.

Bilan : 4 séries de prélèvements/analyse pour chaque cheval au cours de l'année.

Février-Mars : Profil hématologique complet + fiche de prélèvement vétérinaire + fiche de suivi individuel par entraîneur

Avril-Mai : Dosage Ht/PT/urée+ fiche de prélèvement vétérinaire + fiche de suivi individuel par entraîneur

Juillet-Août : Dosage Ht/PT/urée + fiche de prélèvement vétérinaire + fiche de suivi individuel par entraîneur

Octobre-Novembre : Dosage Ht/PT/urée + fiche de prélèvement vétérinaire + fiche de suivi individuel par entraîneur

C. Résultats

A l'issue de la saison, les différentes fiches seront collectées et les données chiffrées étudiées. On réalisera des analyses distinctes puis globales des différentes séries de prélèvements avec études individuelles, intra et intergroupes, et pondération des résultats hématologiques au regard des éléments divers rapportés dans les fiches de suivis et de prélèvements.

Les quatre séries d'analyses, par leur succession, permettront également d'associer les effets dans la durée de l'efficacité de l'entraînement actuel concernant la lutte contre la déshydratation.

Ainsi, par le biais de cette étude simple dans sa réalisation, aidé d'analyses statistiques et physiologiques, on pourra aboutir à de nouvelles applications dans le cadre de l'amélioration de la gestion préparatoire des chevaux d'endurance, soucieuse de conserver notre place dans cette discipline. En effet, ce protocole permet d'analyser conjointement les effets diététiques et athlétiques des chevaux et ce sur des sujets novices ou non, couvrant ainsi largement et de manière précise la population de haut niveau actuelle, ce qui est tout à fait novateur.

Cette analyse n'a malheureusement pas encore vu le jour, faute de financement adéquat.

Une fois ce travail réalisé et correctement expliqué, il serait même envisageable de faire varier de nouveaux paramètres dont l'alimentation par exemple, en utilisant des rations connues mais de caractéristiques différentes sans modifier les autres données, afin d'optimiser pourquoi pas les apports au cheval athlète...

Conclusion

L'effort d'endurance revêt d'indéniables particularités dans les mécanismes physiologiques mis en œuvre lors de sa réalisation. Contrairement aux efforts physiques de très forte intensité, mais de courte durée, l'endurance se définit par sa capacité à se prolonger dans le temps.

Pour y aboutir, le métabolisme énergétique est quasi exclusivement tourné vers la voie aérobie, l'équilibre liquidien vise l'épargne de tous les fluides corporels grâce à différents processus cardio-rénaux finement ajustés, tout en prenant en compte l'aspect primordial de la thermorégulation dans ce type d'effort.

Ce sont ces différents mécanismes, couplés à la composition histologique du tissu musculaire en constante évolution, qui servent de témoins de la progression du cheval athlète dans cette discipline si particulière.

Afin de favoriser cette progression, il est intéressant d'évaluer régulièrement le cheval et ses performances grâce à des paramètres hémato-biochimiques simples mais fiables, en rapport avec l'état d'hydratation immédiat, clef de voûte de l'efficacité athlétique.

Les différents travaux réalisés à ce sujet démontrent la mise en place de mécanismes visant comme dans de nombreuses espèces à une économie liquidienne globale. Dans cette lutte contre la déshydratation, les processus observés chez d'autres mammifères, dont l'homme ou le chien, ne sont pas directement extrapolables au cheval d'endurance. Celui-ci utilise la régulation de sa concentration plasmatique en urée, par le biais de sa flore caecale, comme réserve osmotique efficace, ce qui est tout à fait unique. Cette piste, longtemps ignorée relance totalement la perception de l'entraînement du cheval d'endurance, redonnant une place essentielle à l'alimentation trop souvent considérée comme d'influence secondaire.

Quoique primordiales, ces données, sont principalement basées sur les travaux d'auteurs en majorité étrangers, teintés donc d'influences environnementales particulières, et restent encore très théoriques. Afin de remédier à cela, comme proposé au cours de ce travail, il serait très intéressant de réaliser une évaluation concrète de ces différents éléments au sein d'une population équine française directement impliquée en endurance équestre, afin d'obtenir des résultats plus facilement extrapolables à nos habitudes de préparation, et pourquoi pas remettre en question les méthodes actuelles de préparation du cheval d'endurance. Ceci n'étant à ce jour pas réalisé, faute de financement adéquat.

Bibliographie

1. **ANDREWS FM, SPURGEON TL.** Histochemical staining characteristics of normal skeletal muscle. *Am. J. Vet. Res.*, 1986 **47**, 8, 1843-1852.
2. **ANDREW FM, WHITE SL et al.** Effects of shortening the steeplechase phase (phase B) of a 3-day-event. *Equine Vet. J. Suppl.*, 1995, 20:64.
3. **ART T, AMORY H, LEKEUX P.** Notions de base de physiologie de l'effort. *Prat. Vét. Eq.*, 2000,**32**, n° spécial, 247-254.
4. **ART T, AMORY H et al.** Routine Standardized treadmill exercise tests to assess fitness in endurance Horses. *Pratique Vétérinaire Equine*, 1994, **26**, 25-30.
5. **BARTON M, WILLIAMSON L et al.** Body weight, hematologic findings, and serum and plasma biochemical findings of horses competing in a 48-, 83- or 159-km endurance ride under similar terrain and weather conditions. *American Veterinary Medical Association*, 2003, **64**, No 6, 653-796.
6. **BASSET DR Jr, HOWLEY ET.** Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* 2000, **32**, 1, 70-84.
7. **BENAMOU-SMITH A.** Affections métaboliques du cheval d'endurance et Physiologie sportive du cheval d'endurance. *In : Comptes rendus des journées de l'A.V.E.F.* [cd-rom], Montpellier 2003.
8. **BENAMOU-SMITH A.** L'alimentation du cheval de sport. *In : Forum de nutrition de l'E.N.V.L.*, Lyon 2002, 4 pp.
9. **BERNE R, LEVY M (1988) :** *Physiology*, 2d Edition, St. Louis: Mosby Company.
10. **BETCHEL PJ, LAWRENCE LM.** The muscle and athletic training. *In : Jones W.E. (ed) : Equine Sport Medicine*, Léa & Febbiger, Philadelphia, 1989, 121-136.
11. **BLIGH J :** The thermosensitivity of the hypothalamus and thermoregulation in mammals. *Biol. Rev.* 1966, 41:317,.
12. **BRUCE VL, TUREK RJ, SCHURGH WA.** Muscle fiber compartmentalization in the gluteus medius of the horse. *Equine Vet. J.*, 1993, **25**, 69-72.
13. **BUONO MJ, SJOHOLM NT.** Effect of physical training on peripheral sweat production. *J. Appl. Physiol.*, 1998, **65**, 2, 811-814.
14. **CAMPBELL.** *Biologie*, 1st ed. Bruxelles: De Boeck University, 1995, 1190pp.

15. **CARLSON G and MANSMANN A.** Serum electrolyte and Plasma Protein Alterations in the Horses used in Endurance Rides. *J.A.V.M.A.*1974, **165**, 262-264.
16. **CARLSON G.** Hematologic alterations in endurance-trained horses. *In: Proceeding of the First International Symposium on equine Hematology.* Michigan State University, May 1975, 444-449.
17. **CARTER SL, RENNIS CD, HAMILTON SJ.** Changes in skeletal muscle in males and females following endurance training. *Can. J. Physiol. Pharmacol.*, 2001,**79**, 5, 386-392.
18. **CENA K, MONTEITH JL.** Transfer processes in animal coats II. Conduction and convection. *Proc. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.* 1975, **188**: 395-407.
19. **COSTILL DL.** Sweating : its composition and effects on body fluids. *Ann. NY Acad. Sci.*, 1977, **301**, 160-174.
20. **COSTILL DL, DANIELS J, EVANS W et al.** Skeletal muscle enzymes and fiber composition male and female track athletes. *J. Appl.Physiol.*, 1976, **40**, 2, 149-154.
21. **COYLE EF, GONZALES-ALONSO J.** Cardiovascular drift during exercise : new perspectives. *Exerc. Sport Sci. Rev.*, 2001, **29**, 2, 88-92.
22. **COYLE EF, SIDOSSIS LS, HOROWITZ JF et al.** Cycling efficiency is related to the percentage of type I muscle fibers. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 1992, **24**, 7, 782-788.
23. **DEMONCEAU T.** *Appréciation de l'aptitude physique du cheval d'endurance: intérêt du seuil anaérobie lactique.* Thèse doctorat vétérinaire, Alfort, 1989, 100 pp.
24. **DERMAN KD, NOAKES TD.** Comparative aspects of exercise physiology. *In : Hodgson DR, Rose RJ (eds) : The Athletic Horse.* Saunders, Philadelphia, 1994, 15-25.
25. **DILL DB, COSTILL DL.** Calculation of percentage changes in volumes of blood, plasma, and red cells in dehydration. *J. Appl. Physiol.*, 1974, **37**, 247-248.
26. **DUDLEY GA, ABRAHAM WM, TERJUNG RL.** Influence of exercise intensity and duration on biochemical adaptations in skeletal muscle. *J. Appl. Physiol.*, 1982, **53**, 844-850.
27. **ECKERSTALL PD, SNOW D.** Characterisation of glycoproteins in the sweat of the horse (equus caballus). *Res. Vet. Sci.*, 1984, **36**, 231-234.
28. **ESSEN-GUSTAVSSON B, KARLSTRÖM K et al.** Muscular adaptations of horses during intensive training and detraining. *Equine Vet. J.*,1989, **21**, 27-33.
29. **EURELL JA.** Muscular tissue. *In : Delman H.D., Eurell J.A. (eds) :Textbook of Veterinary Histology,* Baltimore: Williams & Wilkins, 1998, 84pp.
30. **EVANS CL, SMITH DFG, ROSS KA et al.** Physiological factors in the condition of "dry-coat" in horses. *Vet. Rec.*, 1957, **69**, 1-9.

- 31. FAN Y, HSU JC *et al.*** The effects of endurance training on the hemogram of the horse. *Asian-Australian Journal of Animal Sciences.*,2002, **15**, 1348-1353.
- 32. FELDMAN B *et al.*** *Schalm's Veterinary Hematology*, Philadelphia:Lippincott Williams and Wilkins, 5thEdition, 2000, p 72.
- 33. FLANDRROIS R.** Le métabolisme aérobie à l'exercice musculaire. In : Lacour J.R. (ed) : *Biologie de l'exercice musculaire*. 1992, Masson, Paris, 1-19.
- 34. FORMEAN JH.** Metabolic causes of equine exercise intolerance. *Vet. Clin. North Am. Equine Practice*, 1996, **12**, 3, 537-554.
- 35. GEORG RJ, Mc CUTCHEON LJ, LINDINGER MI.** Adaptation to daily exercise in hot and humid ambient conditions in trained Thoroughbred horses. *Equine Vet. J.* 1996, *Suppl*, 22:63.
- 36. GEORG RJ, Mc CUTCHEON LJ, ECKER GL *et al.*** Thermal and cardiorespiratory response of horse to submaximal exercise under hot and humid conditions. *Equine Vet. J. Suppl.*, 1995, 20:125.
- 37. GONYEA WJ, SALE DG *et al.*** Exercise induced increases in muscle fiber number. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 1986, **2**, 1, 1-12.
- 38. GUTHRIE AJ, LUND RJ.** Thermoregulation. Base mechanisms and hyperthermia. *Vet. Clin. North Am. Eq. Pract.*, 1998, **14**, 1, 45-59.
- 39. GUY PS, SNOW DH.** The effect of training and detraining on muscle composition in the horse. *J. Physiol.*, 1977, **269**, 33-51.
- 40. HARRIS RC, MARLIN DJ *et al.*** Metabolic response to maximal exercise of 800m and 2000m in the Thoroughbred horse. *J. Appl. Physiol.*, 1987, **63**, 12-19.
- 41. HEILEMANN M, WOAKES AJ, SNOW DH.** Investigations on the respiratory water loss in horses at rest and during exercise. *Advances in Animal Physiology and Animal Nutrition*, 1990,21:52.
- 42. HINCLIFF K, Mc KEEVER *et al.*** Renal and systemic hemodynamic responses in sustained submaximal exertion in horses. *American Physiological Society*, 1990, **90**, 363-369.
- 43. HODGSON DR, DAVIS RE, Mc CONAGHY FF.** Thermoregulation in the horse in response to exercise. *Br. Vet. J.*, 1994,**150**, 219-223.
- 44. HODGSON DR, Mc CUTCHEON LJ, BYRD SK *et al.*** Dissipation of metabolic heat in the horse during exercise. *J. Appl. Physiol.*, 1993, **74**, 1161-1165.
- 45. HODGSON DR, ROSE RJ, KELSO TB *et al.*** *Respiratory and metabolic responses in the horse during moderate and heavy exercise.* Pflugers Arch 1990, **417**: 73-80.
- 46. HODGSON DR, ROSE RJ.** Effects of a nine-month endurance training programme on muscle composition in the horse. *Vet. Rec.*, 1987, **121**, 271-274.

- 47. HOLLOSZY JO, COYLE EF** Adaptations of skeletal muscle to endurance exercise and their metabolic consequences. *J. Appl. Physiol.*, 1984, **56**, 831-838.
- 48. HORION J.** *Les globules rouges du cheval: physiologie et valeurs usuelles (étude bibliographique)*. Thèse de doctorat vétérinaire, Alfort, 1985, 1-69.
- 49. HOROWITZ JF, SIDOSSIS LS, COYLE EF.** Adaptations of skeletal muscle to endurance exercise and their metabolic consequences. *J. Appl. Physiol.*, 1984, **56**, 831-838.
- 50. JOHN P, KABES R et al.** Haematological-biochemical profile of endurance rides of horses in relation to their performance. *Folio Veterinaria University of Veterinary Medicine*, Kosice, 2001, **4**, 24-27.
- 51. KARPOVICH V.** *Physiologie de l'activité musculaire*, septième édition illustrée. Vigot, 1975, Paris, 654pp.
- 52. KOLB E.** *Physiologie des animaux domestiques*, Vigot Frères, Paris, 1965, 346-358 et 474-503.
- 53. LECLERC JL.** Particularités de l'entraînement du cheval d'endurance. *In : Comptes rendus des Journées Nationales de l'A.V.E.F.*, [cd-rom], Montpellier, 2003.
- 54. LOPEZ-RIVERO JL, AGUERA E et al.** Comparative study of muscle fiber type composition in the middle gluteal muscle of andalusian, thoroughbred and arabian horses. *Journal of Veterinary Science*, 1989, **9** (6), 337-339.
- 55. LOPEZ-RIVERO JL, MORALES-LOPEZ JL et al.** Muscle fibre type composition in untrained and endurance-trained Andalusian and Arab horses, *Equine vet. J.* 1991, **23** (2) 91-93.
- 56. MAC ARTHUR AJ** Thermal interaction between animal and microclimate : A comprehensive model. *J. Theor. Bio.* 1987, **126**, 203-209,.
- 57. MAC KEEVER KH, SCHURG WA et al.** Exercise training-induced hypervolemia in the horse. *Med. Sci. Sports Exerci.*, 1987, **19**, 21-27.
- 58. MARGARIA R, CERRETELLI P, AGHEMO P et al.** Energy cost of running. *J. Appl. Physiol.*, 1963, **18**, 367-373.
- 59. MARLIN D, NANKERVIS K.** *Equine Exercise Physiology*. Blackwell Science, Oxford, 2002, 296 pp.
- 60. MARTINEZ P, SCAGLIONE M et al.** Blood and sweat changes in horse submitted to endurance races. *Avances in Ciencias Veterinarias*, Santiago, 2000, **15**, 19-30.
- 61. Mc CUTCHEON LJ, GEOR RJ.** Sweating. Fluid and ion replacement. *Vet. Clin. North Am. Eq. Pract.*, 1998, **14**, 1, 75-95.

- 62. Mc CUTCHEON LJ, GEOR RJ.** *Influence of training on sweating responses during submaximal exercise in horses.* *J. Appl. Physiol.*, 2000, **89**, 6, 2463-2471.
- 63. NAYLOR JRJ, BAYLY WM, GOLLNICK PD et al.** Effects of dehydration on thermoregulatory of horses during low intensity exercise. *J. Appl. Physiol.*, 1993, **46**, 430-437.
- 64. PALMER SE.** Effect of ambient temperature upon the surface temperature of the equine limb. *Am. J. Vet. Res.*, 1983,**44**,,1098-1101
- 65. PICARD G.** *Etre cavalier d'endurance.* Lavauzelle, Paris,1987, 78 pp.
- 66. POORTMANS JR.** Exercise and renal function. *Sports Med.*, 1984, 1 : 125-153.
- 67. PREVEIRAUD L.** *Etude bibliographique comparée de la physiologie du coureur de fond et du cheval d'endurance: métabolismes énergétiques et musculaires, et thermorégulation.* Thèse de doctorat vétérinaire, Lyon, 2003, 166pp.
- 68. RIVERO JL, SERRANO A, HENKEL P et al.** *Muscle fiber type composition and fiber size in successfully and unsuccessfully endurance-raced horses.* *J. Appl. Physiol.*, 1993, **75**, 4, 1758-1766.
- 69. ROSE RJ, ARNOLD KS et al.** Plasma and sweat electrolyte concentrations in the horse during long distance exercise. *Equine Vet. J.*, 1980, **12**,19-22.
- 70. SCHOTT HC, HINCHCLIFF KW.** Fluids, electrolytes and bicarbonate. *Vet. Clin. North Am. Equine Pract.*, 1993, **9**, 577-604.
- 71. SCHOTT HC, HODGSON DR, BAYLY WM.** Haematuria, pigmenturia and proteinuria in exercising horses. *Equine Vet. J.*, 1995, **27**, 67-72.
- 72. SLOET VAN OLDRUITENBORGH-OOSTERBAAN MM, WENSING TH, BARNVELD A et al.** Heart rate, blood chemistry and performance of horses competing in a 100 km endurance ride. *Vet. Rec.*, 1991, **108**, 374-378.
- 73. SNOW DH, GUY PS.** Muscle fiber type composition of a number of limb muscles in different types of horse. *Res. Vet. Sci.*, 1980, **28**, 137-144.
- 74. SNOW DH, VALBERG SJ.** Muscle anatomy, physiology and adaptation to exercise and training. In: *Hodgson DR, Rose RJ (eds): The Athletic Horse.* Saunders, Philadelphia, 1994, 146-179.
- 75. THAYER RE, RICE CL, PETTIGREW FP et al.** The fiber composition of skeletal muscle. In : *Poortmans JR (ed) : principles of exercise biochemistry, 2nd* , rev. Ed. Med. Sport. Sci., Basel, Karger, 1993, **38**, 25-50.
- 76. VILLIGER B, EGGER K, LERCH R et al.** *L'endurance, théorie, et pratique.* Masson, Paris, 1992, 259 pp.
- 77. WADE CE.** Response, regulation, and action of vasopressin during exercise : A review. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 1984, **16**, 506-511.

78. WOLTER R. Diététique du cheval athlète (1° partie). *Prat. Vét. Eq.*, 1991, **23**, 3, 19-30.

79. WOLTER R. *Alimentation du cheval*, (2° édition). Editions France Agricole, Tours, 1999, 478 pp.

Rapport-gratuit.com 
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES