

INFLUENCE DES CARACTERISTIQUES DE LA LOCOMOTION SUR LA DEPENSE ENERGETIQUE DU CHEVAL A L'EFFORT

BARREY E. (*), DEMONCEAU T. (**), VALETTE J.-P. (*)

(*) Laboratoire de physiologie sportive INRA, Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort
7 Av du Général de Gaulle, 94704 Maisons Alfort Cedex.

(**) EquAthlon

RESUME: En course d'endurance, l'objectif étant de parcourir une longue distance à une vitesse moyenne maximale, l'efficacité des mouvements locomoteurs détermine la vitesse d'épuisement des réserves énergétiques. En course de galop ou de trot, la problématique est analogue mais les voies métaboliques mises en jeu sont différentes. Au cours de tests d'effort visant à déterminer le seuil aéro-anaérobie, nous avons mesuré les paramètres énergétiques et les caractéristiques de la foulée en fonction de la vitesse. Les résultats révèlent que la fréquence de la foulée est le facteur qui explique le mieux la dépense énergétique évaluée par la fréquence cardiaque et la lactatémie. En conséquence, pour accroître sa vitesse de manière économique, le cheval doit privilégier l'allongement de ses foulées plutôt que l'accélération de leur fréquence. Au seuil aéro-anaérobie, il est intéressant de noter que la fréquence et la longueur de la foulée adoptées par les chevaux dépendent étroitement de leur format. Sur le plan pratique, il apparaît judicieux d'utiliser la fréquence de la foulée comme indicateur de la charge de travail.

MOTS CLES : ALLURE - FOULEE - METABOLISME ENERGETIQUE - SEUIL ANAEROBIE - LOCOMOTION - ENTRAINEMENT

En course de trot, de galop ou d'endurance, les meilleurs chevaux parviennent à courir à une vitesse moyenne supérieure à celle des autres chevaux. Les réserves énergétiques étant limitées, les individus qui adoptent la locomotion la plus économique, ont une meilleure aptitude sportive car l'épargne de leur stock énergétique leur permet de soutenir un exercice plus intense pendant la course. D'un point de vue théorique, le calcul du rendement locomoteur préciserait parfaitement cette notion sachant qu'il est défini par le rapport entre la

dépense énergétique qui est faite et l'énergie cinétique acquise par le cheval pendant une unité de temps. Cette formulation théorique des rapports entre le métabolisme énergétique impliqué au cours de l'effort et les caractéristiques de la foulée s'inspire de plusieurs résultats expérimentaux établis précédemment.

HOYT et TAYLOR (1981) ont clairement démontré, pour chaque allure, l'existence d'une vitesse optimale pour laquelle le coût énergétique du mètre parcouru était minimal. Par ailleurs, en athlétisme, il

existe une cadence et une amplitude du pas optimales en fonction des caractéristiques du sujet et de l'effort demandé. Des expérimentations de neuro-physiologie de la locomotion chez les animaux de laboratoire révèlent des mécanismes de contrôle bien distincts des deux composantes de la vitesse de déplacement que sont la fréquence et l'amplitude des mouvements locomoteurs. Des résultats de travaux antérieurs ont montré que les variations de vitesse des chevaux s'expliquaient davantage par le changement de la longueur des foulées que par l'élévation de leur fréquence. Ces données ont pu être rapprochées de paramètres morphométriques tels que le poids et la taille (BARREY 1987). La fréquence des foulées est plus lente chez les chevaux de grand format qui ont une foulée plus ample (BARREY et al. 1989).

L'objet de ce travail a donc été de mettre en évidence les rapports existants entre certains paramètres du métabolisme énergétique et les caractéristiques de la locomotion telles que la vitesse, la fréquence et la longueur des foulées.

MATERIEL ET METHODE

Ce protocole expérimental a été réalisé au cours de tests d'effort visant à déterminer le seuil anaérobie lactique chez des chevaux d'endurance (DEMONCEAU 1989).

Chevaux

Les mesures ont été faites sur 8 chevaux spécialisés dans les disciplines de TREC et

de Concours complet d'équitation (Tableau 1). Au moment des tests d'effort, tous ces chevaux effectuaient un travail d'entraînement quotidien propre à chacune des disciplines.

Test d'effort standardisé

Celui-ci a eu lieu sur une piste en sable, balisée à intervalles réguliers sur 1000 m de circonférence. Après un premier palier d'échauffement de 5 minutes au trot à 15 km/h, les chevaux galopaient pendant 3 minutes à des paliers de vitesse croissante 24, 27, 30 et 35 km/h. Entre chaque palier, un temps de repos à l'arrêt de 1 min 30 s permettait de faire une prise de sang à la veine jugulaire moins d'une minute après la fin du palier précédent. Ainsi, les chevaux parcouraient une distance totale de 7050 m en 17 minutes. La vitesse des paliers d'effort était régulée par une automobile qui précédait les chevaux et fixait sa vitesse par rapport au temps de passage devant les balises.

Mesures des paramètres physiologiques et locomoteurs

La fréquence cardiaque constitue un bon indicateur du recrutement du métabolisme aérobie au cours d'un exercice physique. Celle-ci a donc été mesurée en continu au moyen d'un cardio-fréquence-mètre¹ qui enregistre la fréquence cardiaque toutes les 15 s. Les fréquences enregistrées sur toute la durée de chacun des paliers ont ensuite servi à calculer une moyenne de la fréquence cardiaque (FC).

Les prélèvements sanguins effectués après chaque palier étaient centrifugés dans l'heure qui suivait. Après détermination de l'hématocrite, le plasma était recueilli et conservé à + 4 °C. La concentration plasmatique en lactate était mesurée par un analyseur automatique² puis le résultat était multiplié par (1-Hématocrite) pour calculer la lactatémie (LA).

Trois paramètres locomoteurs ont été pris en considération : la vitesse (V), la longueur (LF) et la fré-

¹ Horse Tester PFH 200, Polar electro, Finlande.

² TDX-Abbott

Tableau 1 : caractéristiques des chevaux testés.

Chevaux	Poids	Age	Sexe	Race	Discipline
CV1	448	11	F	SF	C.C.E.
CV2	601	9	H	SF	C.C.E.
CV3	368	11	F	PD	TREC
CV4	420	6	F	PD	TREC
CV5	487	10	H	CS	TREC
CV6	401	8	H	CS	TREC
CV7	496	7	H	CS	TREC
CV8	490	5	F	CS	TREC

quence (FF) de la foulée. Un cycle locomoteur correspond à une foulée dont les caractéristiques varient selon le format du cheval, l'allure et la vitesse. Les deux composantes de la vitesse sont la fréquence et la longueur de la foulée qui sont liées par la relation suivante :

$$\text{Vitesse} = \text{Fréquence} \times \text{Longueur}$$

(m/min) (foulées/min) (m)

La fréquence ou cadence exprime le nombre de foulées effectuées par unité de temps. La longueur des foulées ou amplitude correspond à la distance qui sépare deux traces consécutives du même pied. Au cours de chaque palier d'effort, la fréquence des foulées était déterminée en chronométrant le temps écoulé pour faire 40 foulées successives. On obtenait donc : $FF = 40/\text{temps}$. La vitesse étant fixée par les conditions expérimentales, il était possible d'en déduire la longueur de la foulée : $LF = V/FF$. La précision de mesure de la fréquence de la foulée, liée à l'imprécision du chronométrage manuel, est de l'ordre de +/- 1 foulée/min.

Traitement des résultats

Quatre paramètres décrivaient l'adaptation du cheval à l'effort demandé au cours

de chaque palier : FC, LA, FF et LF. L'évolution de ces paramètres en fonction de la vitesse est visualisée sous forme de courbes : lactatémie-vitesse, fréquence cardiaque-vitesse, fréquence de la foulée-vitesse, longueur de la foulée-vitesse. Afin de calculer la vitesse au seuil anaérobie, la relation lactatémie-vitesse est modélisée par la relation suivante (DEMONCEAU T. et BARREY E. 1989) :

$$LA = e(A.V + B) + C$$

La vitesse au seuil anaérobie lactique (V_s) est celle qui correspond à un accroissement de lactatémie de 0,2 mmol/l pour une élévation de vitesse correspondante de 1 km/h. Cette méthode analytique du calcul du seuil est rapide et permet d'éviter l'imprécision inhérente aux méthodes graphiques. Une fois V_s déterminée, la valeur des autres paramètres était calculée à cette vitesse particulière. On obtenait donc les valeurs LAs, FCs, FFs et LFs pour chacun des 8 chevaux.

Analyse statistique

Les résultats ont été étudiés par une analyse des corrélations entre les paramètres LA, FC, FF, LF, POIDS et V.

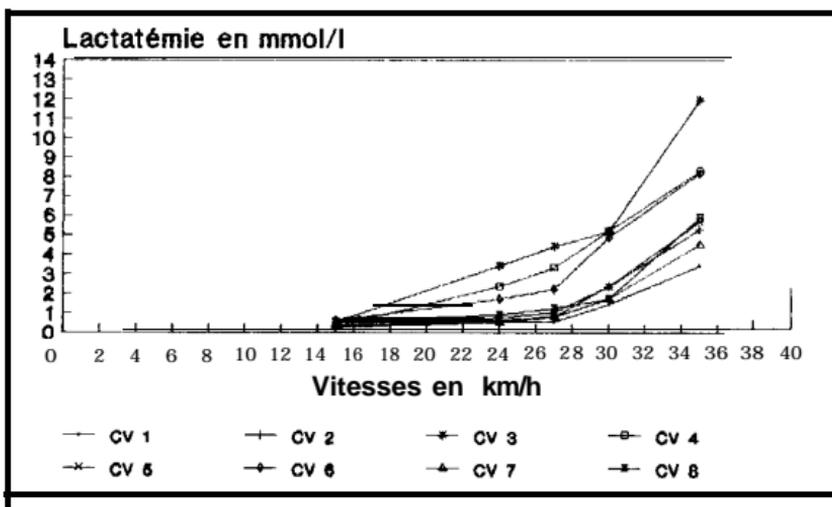


Figure 1 :
Evolution de la lactatémie en fonction de la vitesse.

Figure 2 :
Evolution de la fréquence cardiaque en fonction de la vitesse.

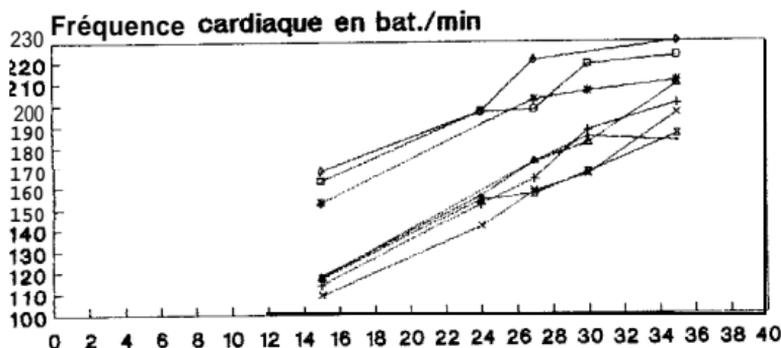


Figure 3 :
Evolution de la fréquence de la foulée en fonction de la vitesse.

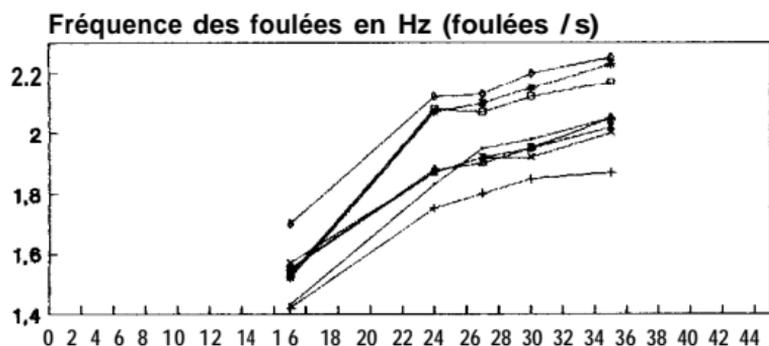
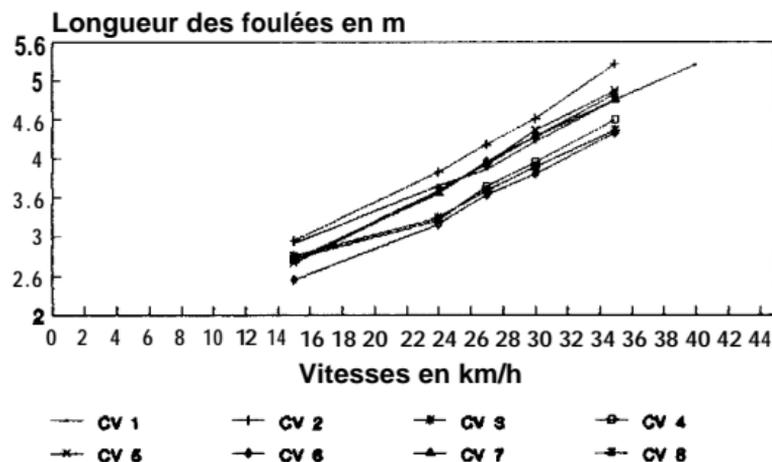


Figure 4 :
Evolution de la longueur de la foulée en fonction de la vitesse.



RESULTATS

Les figures 1, 2, 3 et 4 illustrent les résultats obtenus pour les quatre paramètres LA, FC, FF et LF sur les 8 chevaux testés. La fréquence cardiaque et la longueur de la foulée augmentent proportionnellement à la vitesse. Par contre, la lactatémie et la fréquence de la foulée n'évoluent pas linéairement en fonction de la vitesse. La lactatémie s'élève d'abord faiblement puis à partir de la vitesse correspondant au seuil anaérobie, elle s'accroît rapidement suivant un modèle exponentiel. Aux vitesses faibles, la fréquence de la foulée s'élève vite puis au fur et à mesure que la vitesse augmente, elle se stabilise à une valeur maximale comprise entre 112 et 135 foulées/min.

Les données de lactatémie permettent de calculer les vitesses au seuil anaérobie (Figure 5) dont la valeur moyenne est de 25,3 (+/- 3,5) km/h. La décomposition de cette vitesse en fréquence et longueur de la foulée précise la stratégie locomotrice des chevaux à cette puissance particulière où le métabolisme anaérobie est largement recruté (Figures 6 et 7). En moyenne, la fréquence de la foulée au seuil anaérobie vaut 117 (+/- 5) foulées/min et la longueur correspondante 3,61 (+/- 0,59) m. Le calcul du coefficient de variation révèle que la fréquence de la foulée au seuil fluctue seulement de 4% autour de la moyenne tandis que pour la longueur et la vitesse seuil, les fluctuations sont respectivement de 16 et 14%.

L'étude des corrélations multiples met en évidence une liaison plus étroite entre la fréquence de la foulée (FF) et les paramètres énergétiques (LA et FC) qu'entre la longueur de la foulée ou la vitesse et ces mêmes paramètres (Tableau 2). Par ailleurs, il ressort que les chevaux de plus gros format adoptent une fréquence de foulée plus lente.

DISCUSSION ET INTERPRETATION

Sur cet échantillon de chevaux, nous observons une évolution des paramètres

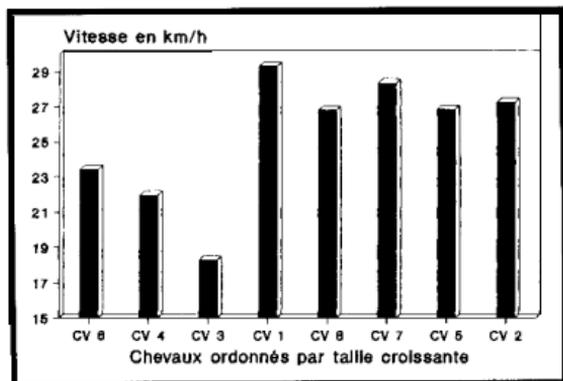


Figure 5 : Vitesses calculées au seuil anaérobie (V_s). Les chevaux sont ordonnés de gauche à droite par taille croissante.

	FC	LA	FF	LF	V	POIDS
FC	1,00					
LA	0,74	1,00				
FF	0,89	0,71	1,00			
LF	0,57	0,58	0,59	1,00		
V	0,76	0,73	0,82	0,95	1,00	
POIDS	-0,43	-0,35	-0,43	0,27	0,00	1,00

(N=40 ; R35 ddl = 0,42 au seuil 1 %)

Tableau 2 : Corrélations entre les paramètres de fréquence cardiaque (FC), de lactatémie (LA), de fréquence de la foulée (FF), de longueur de la foulée (LF) et du poids des chevaux.

locomoteurs FF et LF en fonction de la vitesse analogue à celle qui a été établie précédemment par DUSEK (1970) et LEACH et al. (1987). Au pas et au petit trot, l'accroissement de la vitesse est essentiellement dû à l'augmentation de la fréquence des foulées. Par contre, aux allures plus rapides, comme au galop pratiqué au cours de ce test d'effort, le cheval augmente sa vitesse surtout par l'allongement de sa foulée. Tout en se déplaçant à la même vitesse, deux chevaux adoptent des

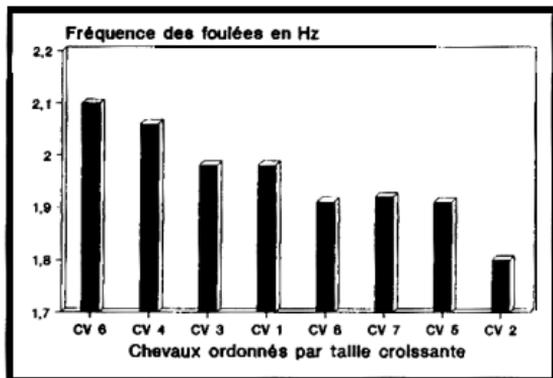


Figure 6 : Fréquences de la foulée à la vitesse Vs correspondant au seuil anaérobie. Les chevaux sont ordonnés par taille croissante.

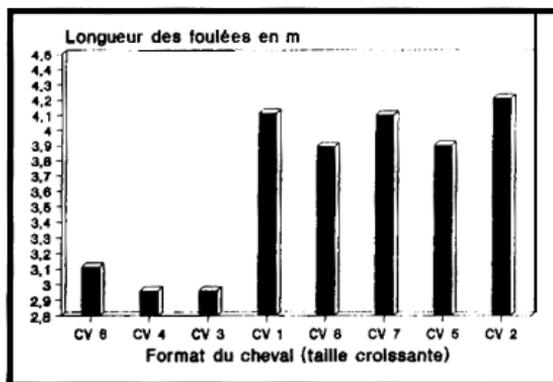


Figure 7 : Longueur de la foulée à la vitesse Vs correspondant au seuil anaérobie. Les chevaux sont ordonnés par taille croissante.

stratégies locomotrices différentes. L'un privilégiera la cadence, l'autre l'amplitude de sa foulée. A ce titre, il ressort que les chevaux de plus grand format adoptent une fréquence de foulée plus lente.

Sur le plan énergétique, les résultats font clairement apparaître l'influence prédominante de la fréquence de la foulée sur l'élévation de la consommation énergétique. La répétition des mouvements locomoteurs

coûte davantage d'énergie que l'augmentation de l'amplitude. En conséquence, pour accroître sa vitesse de manière économique, le cheval doit privilégier l'allongement de ses foulées plutôt que l'accélération de leur fréquence.

Au seuil anaérobie, nous constatons que tous les chevaux adoptent une fréquence de foulées particulière que nous évaluons, en moyenne, à 117 foulées/min. Sur l'échantillon considéré, l'écart autour de cette valeur est faible (4 %) malgré l'hétérogénéité des caractéristiques des chevaux (poids, taille, état d'entraînement, spécialisation). Des investigations supplémentaires sur un plus grand nombre de chevaux devraient confirmer l'hypothèse selon laquelle il existerait une fréquence de foulées au seuil anaérobie qui serait relativement constante d'un cheval à l'autre. Concrètement, ce résultat signifie qu'au-delà de 120 foulées/min le métabolisme anaérobie prédomine, alors qu'en dessous de cette valeur le métabolisme aérobie assure la majorité des dépenses énergétiques. Sur le plan pratique, il apparaît judicieux d'entraîner son cheval à une cadence proche de 2 foulées par seconde (soit 120 foulées/min) pour augmenter sa capacité aérobie.

A la vitesse correspondant au seuil anaérobie, il est intéressant de noter que la fréquence et la longueur des foulées adoptées par les chevaux dépendent étroitement de leur format. Les petits formats ont une foulée d'amplitude plus faible qu'ils compensent par une fréquence plus élevée qui est moins économique. Les petits formats ont des lactatémies au seuil plus élevées mais il semble que physiologiquement, leur organisme soit adapté à un niveau de recrutement du métabolisme anaérobie plus bas comme VALETTE et al. (1989) l'ont constaté chez le poney.

APPLICATIONS PRATIQUES

La fréquence de la foulée étant bien corrélée aux paramètres énergétiques de fréquence cardiaque et de lactatémie, elle peut être utilisée comme indicateur de travail. En effet, sa mesure est simple puisqu'il suffit au cavalier de compter le nombre de foulées que son

cheval effectue pendant un intervalle de temps donné (chronomètre à signal sonore). Le résultat de la mesure permet d'estimer la charge de travail demandée à un cheval au galop, en calculant la fréquence cardiaque d'après l'équation de régression suivante :

$$FC = 2,14xFF - 69,63 \quad (r=0,89)$$

où FF est exprimée en foulées/min et FC en battements/min

Si, par exemple, la fréquence de la foulée est de 115 foulées/min, la fréquence cardiaque estimée est égale à 176 battements/min. Chez le cheval, on estime que la transition aéro-anaérobie se fait pour une fréquence cardiaque de l'ordre de 180 battements/min, au-delà de 200 battements/min l'exercice implique essentiellement le métabolisme anaérobie.

Pour utiliser plus précisément ce type de relation pour ajuster le travail d'entraînement, nous préconisons de suivre la méthodologie suivante :

1- Faire un test d'effort par paliers de vitesse croissante, en mesurant au cours de l'exercice les paramètres FC, FF et V.

2- Etablir les relations FC en fonction de FF.

3- Choisir, en fonction de la fréquence cardiaque de 180 battements/min, une gamme de fréquences de la foulée adaptée au travail d'entraînement en aérobie. On peut également définir la gamme de fréquences de la foulée qu'il faut soutenir pour accroître la capacité anaérobie. Pour cela, on recherchera les fréquences de la foulée correspondantes aux fréquences cardiaques supérieures à 200 battements/min.

Pour accroître encore la précision de la relation entre les caractéristiques de la foulée et le métabolisme énergétique, il faut effectuer une détermination du seuil anaérobie lactique au cours du test d'effort. La relation lactatémie-fréquence de la foulée, plus complexe à définir, pourra alors servir d'indicateur pour régler le train d'une course d'endurance.

CONCLUSION

Ces premiers résultats mettent en évidence de façon significative les rapports étroits qui existent entre les paramètres locomoteurs et les paramètres de dépense énergétique. Ils méritent d'être approfondis et confirmés par d'autres expérimentations en cours. Les

conséquences pratiques de ces résultats expérimentaux montre qu'il est possible de mener un entraînement de manière rationnelle avec peu de moyens techniques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

- BARREY E. (1987), Biomécanique du pied du cheval: étude expérimentale, Thèse de doctorat vétérinaire, ENV Alfort.
- BARREY E., VALETTE J.-P., WOLTER R. (1989), Etude multifactorielle de l'aptitude à l'effort chez le cheval, *Annales de Zootechnie* 38, 157-169.
- DEMONCEAU T. (1989), Appréciation de l'aptitude physique du cheval d'endurance : intérêt du seuil anaérobie lactique, Thèse de doctorat vétérinaire, ENV Alfort.
- DEMONCEAU T., BARREY E., VALETTE J.-P. (1989), Détermination de la zone de transition aéro-anaérobie par modélisation de la relation lactatémie-vitesse chez le cheval d'endurance, *Sciences et sport* 4, 333.
- DUSEK J., EHRLEIN H.J., Van ENGELHARDT W. and al. (1970), Beziehungen zwischen Trittlänge, Trittfrequenz und Geschwindigkeit bei Pferden, *Z. Tierzücht. Zücht. Biol.* 87, 177-188.
- HOYT D.F., TAYLOR C.R. (1981), Gait and the energetics of locomotion in horse, *Nature* 292, 239-240.
- LEACH D.H. (1987), Locomotion of the athletic horse, *Equine Exercise Physiology II*, GILLESPIE J.R. & ROBINSON N.E., ICEEP Pub., Davis.
- VALETTE J.-P., BARREY E., WOLTER R. (1989), Estimation du seuil anaérobie chez le poney, *Annales de Zootechnie* 38, 229-236.

A PARAITRE FIN 1990 :
EquAthlon NUMERO SPECIAL

L'ENTRAINEMENT DU CHEVAL-ATHLETE

Aspects pratiques du suivi médico-sportif

Comment conduire une préparation physique rationnelle, quels critères physiologiques simples faut-il mesurer, quelle alimentation pour quelle activité physique, comment prévenir la pathologie liée à l'entraînement...