

20ème Journée d'Étude



2 Mars 1994

Aspects cardio-respiratoires de la médecine sportive équine

Cardiorespiratory aspects of equine sport medicine

Par P. Lekeux, et Tatiana Art

Centre de Médecine sportive équine, Faculté de médecine vétérinaire, Université de Liège", Bât. B42, Sart Tilman, B-4000 Liège

Résumé

Cet article passe en revue les différents maillons de la chaîne de l'oxygène, dont l'intégrité est indispensable pour la réalisation d'une performance chez le cheval de sport. Les facteurs potentiellement limitants sont identifiés et analysés afin de pouvoir en minimiser l'impact négatif sur les prestations sportives des chevaux.

Mots-clés : Médecine sportive - oxygène - fonction cardio-respiratoire

Summary

This paper analyses the several links of the oxygen pathway, the integrity of which is essential for the accomplishment of performances in sport horses. The potentiel limiting factors are identified and analyzed in order to be able to minimize their negative effect on equine performances.

Key-words : Sport medicine - oxygen - cardiorespiratory function

1. INTRODUCTION

A l'aspect thérapeutique et préventif de la médecine du cheval, est venue s'ajouter, au cours de la dernière décennie, une troisième dimension : l'optimisation des performances sportives des équidés grâce à une gestion appropriée de leurs potentialités génétiques.

L'importance de cette nouvelle philosophie dans le domaine de la médecine sportive est indéniable. L'essor formidable qu'ont connu ces 10 dernières années les connaissances en matière de physiologie de l'effort des animaux en général, et des équidés en particulier, en est l'incontestable preuve. La finalité est d'offrir aux entraîneurs et aux propriétaires des méthodes de management qui permettront l'optimalisation et la pérennité des performances de leurs animaux.

Le but de cet article est d'analyser les aspects cardio-respiratoires de la médecine sportive équine. Ces derniers jouent en effet un rôle-clé dans le métabolisme aérobique dont le bon fonctionnement est indispensable à la réalisation d'une performance chez les chevaux de sport.

2. CHAÎNE DE L'OXYGÈNE ET FACTEUR LIMITANT DE LA PERFORMANCE

Pour assurer ses fonctions métaboliques, chaque cellule consomme de l'oxygène et produit du dioxyde de carbone. Chez les organismes unicellulaires de petite taille, la surface de la cellule permet d'assurer des échanges gazeux adéquats entre le milieu extérieur et le milieu intracellulaire, et cela par simple diffusion. Malheureusement, ce mécanisme très simple n'est suffisamment efficace que chez des organismes dont le diamètre ne dépasse pas le millimètre.

Les organismes pluricellulaires ont en effet dû se doter de structures plus spécialisées afin d'être en mesure d'assurer des échanges gazeux proportionnels aux besoins des cellules. C'est ainsi que se sont développés différents systèmes de transport de ces gaz entre le milieu extérieur et les mitochondries. Le système respiratoire assure le transfert de l'oxygène et du dioxyde de carbone entre l'air et le sang et le système circulatoire assure le transport de ces gaz entre le poumon et les cellules.

Cette spécialisation a contribué à augmenter considérablement les possibilités d'échanges gazeux entre l'organisme et son environnement extérieur et donc l'aptitude des êtres à transformer l'énergie. Malheureusement, elle a également contribué à rendre ces mécanismes beaucoup plus complexes. Cette spécialisation a en effet fait apparaître la notion de "Chaîne de l'oxygène" où chaque maillon s'inscrit dans un contexte de solidarité suivant le principe "un pour tous, tous pour un".

Dès lors, chaque maillon déficient devient un facteur limitant pour l'ensemble de la Chaîne, c'est-à-dire pour les échanges gazeux et donc pour la transformation de l'énergie.

2.1. Facteur limitant

Cette notion de travail à la chaîne et de solidarité n'est pas sans conséquences fonctionnelles. En effet, l'efficacité de chaque maillon est moins importante en terme de valeur absolue qu'en terme de valeur relative. C'est en effet le maillon le plus faible de la Chaîne qui

détermine le niveau auquel les autres maillons vont travailler, indépendamment de leur réel potentiel. C'est pourquoi un des systèmes du transport des gaz entre l'air et les mitochondries peut devenir limitant, soit parce qu'il présente une déficience fonctionnelle, soit parce que son potentiel ne s'est pas amélioré dans la même mesure que celui des autres maillons, soit que l'organisme se situe dans un environnement hostile ou dans des circonstances inappropriées pour l'espèce concernée.

Heureusement, dans la grande majorité des situations, la chaîne de transport des gaz respiratoires est tout à fait capable d'assurer des échanges gazeux proportionnels aux besoins des cellules. Chaque maillon a en effet acquis un potentiel suffisant pour éviter d'être un élément limitant dans les conditions dites physiologiques, selon le principe du symmorphosis (Weibel et al, 1987). Cet équilibre, propre à chaque catégorie d'êtres vivants, résulte d'une évolution à la fois adaptative (due à la sélection naturelle par exemple), allométrique (due à la croissance corporelle par exemple) et induite (due à l'entraînement par exemple).

2.2. Chaîne de l'oxygène

Le transfert de l'oxygène entre l'air et les mitochondries se réalise principalement grâce aux phénomènes de convection et de diffusion. Cinq étapes peuvent être artificiellement individualisées :

- la ventilation pulmonaire qui permet d'amener l'oxygène dans les alvéoles par convection ;
- la diffusion alvéolo-capillaire lui permet de transférer l'oxygène de l'air vers le sang par diffusion ;
- la circulation sanguine qui permet l'apport d'oxygène aux tissus par convection ;
- la diffusion capillaire-cellule qui permet le transfert gazeux des capillaires artériels vers les mitochondries et
- la combustion de l'oxygène à l'intérieur des mitochondries.

2.3. Importance relative des différentes étapes dans la consommation maximale d'oxygène

L'oxygène est indispensable pour la transformation aérobie de l'énergie nécessaire à la croissance, à l'exercice physique, à la thermorégulation, aux métabolismes et à toutes les productions animales en général. Cette consommation dépend évidemment des besoins de l'organisme : un exercice intense peut augmenter de 40 fois la consommation d'oxygène de repos. Chaque maillon de la chaîne doit donc ajuster l'intensité de son fonctionnement aux besoins en échanges gazeux des tissus.

2.3.1. Capacité oxydative des muscles squelettiques

La consommation maximale d'oxygène par l'organisme ne peut en fait jamais dépasser les capacités de combustion de ce gaz par les mitochondries. Il a en effet été démontré qu'1 ml de mitochondrie consomme environ 4 ml d'oxygène par minute (Kayar et al, 1989). Il existe chez nos animaux domestiques une relation linéaire entre le volume mitochondrial et la consommation maximale d'oxygène (Wagner et al, 1991). Cette dernière va donc dépendre

non seulement de la masse corporelle maigre globale de l'organisme mais également du volume relatif des mitochondries. C'est ce qui explique que, à poids corporel identique, la consommation maximale d'oxygène est près de trois fois supérieure chez le cheval par rapport au bovin et chez le chien par rapport à la chèvre (Taylor et Weibel, 1991).

2.3.2. Apport d'oxygène par les capillaires des muscles squelettiques

Cet apport dépend de la longueur totale des capillaires qui dépend elle-même du volume musculaire de l'organisme et de la densité des capillaires. Cette dernière est significativement supérieure chez les animaux sportifs par rapport aux autres (Hoppeler et al, 1981) et chez les animaux de conformation normale par rapport aux hypervieilles (Stavaux et al, soumis pour publication). L'extraction de l'oxygène va donc partiellement dépendre de deux aspects de cette perfusion périphérique : la résistance vasculaire à l'écoulement du sang et le temps de transit capillaire, c'est-à-dire le rapport entre le volume sanguin capillaire et le débit sanguin musculaire.

2.3.3. Transport de l'oxygène par l'hémoglobine

Etant donné la faible quantité d'oxygène dissous dans le sang et les tissus, le transport de l'oxygène par l'hémoglobine est un maillon important de la chaîne de ce gaz. C'est ce qui explique d'une part, l'effet négatif de l'anémie sur les échanges gazeux et d'autre part, l'effet positif de l'hémoconcentration induite par l'exercice chez les animaux sportifs mais non chez les sédentaires (Weibel et al, 1987).

2.3.4. Débit cardiaque

Ce dernier est déterminé par la fréquence cardiaque et le volume d'éjection systolique. A poids corporel identique, il n'y a guère de différence entre la fréquence cardiaque maximale d'un animal sportif et d'un sédentaire. Par contre, le volume d'éjection systolique maximal est près de deux fois supérieur chez les espèces sportives comme le cheval et le chien (soit environ 3ml/ kg de PV) par rapport aux animaux de production (soit environ 1.5 ml/kg de PV) (Karas et al, 1987). D'autre part, la contractilité du myocarde, et donc le volume d'éjection systolique maximal, sont significativement réduits chez les animaux hypervieilles (Amory et al, 1992 ; 1993).

2.3.5. Echanges gazeux pulmonaires

Les "anciens" ont longtemps considéré que la fonction majeure du poumon était de refroidir le sang. Ce n'est qu'à partir de Lavoisier que le rôle crucial du poumon dans les échanges gazeux a été définitivement reconnu. Depuis lors, d'autres fonctions du système respiratoire ont été mises en évidence dans différents domaines comme la thermorégulation (le halètement par exemple), la circulation sanguine (le filtrage du sang par exemple) et l'endocrinologie (la synthèse, la transformation ou la clearance de substances vasoactives).

Comme pour les autres maillons de la Chaîne de l'oxygène, la fonction pulmonaire a de formidables capacités d'adaptation par rapport aux besoins et les réserves ventilatoires sont souvent considérables. Certaines espèces sont en effet capables d'augmenter plus de 30 fois leur

ventilation minute, et ce grâce à une augmentation de leur fréquence respiratoire et de leur volume courant (Art et al, 1990a).

L'adaptation de la ventilation par rapport aux besoins est assurée grâce au contrôle de la respiration, mécanisme complexe qui fonctionne selon le principe du feed-back négatif. En résumé et de manière exagérément simplifiée, l'hypoxémie et l'hypercapnie stimulent, via les différents types de chémorécepteurs, les centres respiratoires. Ces derniers génèrent une hyperventilation, qui en retour, corrige les déficiences en échanges gazeux.

En raison de ses importantes capacités de réserve, il a été longtemps admis que les échanges gazeux pulmonaires ne représentaient un facteur limitant de la chaîne de l'oxygène que dans des circonstances exceptionnelles, comme la haute altitude, une diminution importante de la surface d'échange gazeux pulmonaire ou une immaturité du tissu pulmonaire. Il en est évidemment de même pour les autres fonctions du poumon.

Néanmoins, au cours de ces dernières années, il est apparu évident que le système respiratoire n'était pas toujours en mesure de jouer pleinement son rôle dans certaines situations particulières mais non exceptionnelles rencontrées par exemple chez les chevaux de compétition (Lekeux et Art, 1993).

3. ACQUIS RECENTS EN MATIERE DE PHYSIOLOGIE CARDIO-RESPIRATOIRE DE L'EXERCICE

3.1. Consommation d'O₂

Bien que les premières tentatives de mesure de la consommation d'O₂ datent du siècle dernier (Zunt, 1896), ce n'est que depuis peu que la détermination de la consommation maximale d'O₂ (V_{O₂max}), utilisée de longue date en médecine humaine pour l'appréciation des capacités aérobiques de l'athlète, a été réalisée de façon directe, reproductible et fiable sur le cheval (Persson, 1983). Cette mesure requérait antérieurement l'utilisation d'un matériel lourd, entre autres le port d'une valve IN-EX pour la récolte des gaz expirés. Outre le fait que les appareils étaient contraignants pour le cheval, ils pouvaient également induire des altérations de la stratégie respiratoire et altérer le caractère physiologique des mesures. Des expériences ont donc été réalisées pour surmonter les difficultés techniques que représentait ce type de mesure (Bayly et al, 1987 ; Evans et Rose, 1988a ; 1988b). Une solution a été proposée pour éviter les inconvénients propres au masque. Elle est basée sur l'utilisation d'un système de pompe à vide qui aspire l'air au travers du masque à un débit d'environ 1000 l/min, réduisant ainsi de façon importante la résistance à l'écoulement de l'air (Bayly et al, 1987). Plus récemment encore, l'utilisation de matériel aussi sophistiqué que le spectromètre de masse et le pneumotachographe à ultrasons a également permis la mesure de la V_{O₂max} de façon fiable, aisée, confortable pour le patient et instantanée (Woakes et al, 1987 ; Art et al, 1990a). La simplification et la légèreté du matériel porté par le cheval au cours de ce dernier type de test permettent son application à des fins cliniques.

3.2. Système cardio-vasculaire

Durant ces 25 dernières années, le système cardio-vasculaire a fait l'objet d'une attention toute particulière de la part des chercheurs. Dans un premier temps, l'hématologie de repos a été étudiée comme paramètre éventuel pour l'estimation de la condition physique (Persson, 1969 ; Archer, 1974 ; Jeffcott, 1974 ; Stewart et Steel, 1974) mais, par la suite, certains risques d'erreurs inhérents à cette approche ont été mis en évidence (Muylle et al, 1983 ; Snow, 1983).

La vidange splénique induite par l'effort a été décrite pour la première fois par Persson (1967). Ensuite, dans une étude sur l'hémorhéologie du cheval, il était suggéré que ce phénomène s'accompagnait d'une élévation du taux d'échinocytes - globules rouges à déformabilité réduite -, induisant une modification de la viscosité sanguine pouvant être parfois défavorable à l'oxygénation adéquate des tissus (Boucher et al, 1981 ; Boucher, 1987).

La détermination du score cardiaque à partir d'un examen électrocardiographique a été utilisée pour estimer la taille du coeur (Steel et Stewart, 1972 ; Moodie et Sheard, 1980 ; Nielsen et Vibe-Petersen, 1980), mais la fiabilité de cet examen et surtout sa valeur prédictive de l'aptitude à l'effort ont été fortement controversées et sont toujours sujettes à polémiques (Gross et al, 1974 ; Physick-Sheard et Hendren, 1983). D'autres ont essayé avec un succès relatif de corréler les courbes de récupération de la fréquence cardiaque avec la tolérance à l'effort (Cardinet et al, 1963 ; Aitken et al, 1976 ; Engelhardt, 1977). Il est cependant très vite apparu que l'étude de l'adaptation du système cardio-vasculaire à l'effort, comme celle des autres systèmes sollicités lors d'un exercice, ne pouvait se faire de façon parfaitement fiable et rigoureuse que lors de l'exercice. Certains ont dès lors étudié les effets de l'exercice sur des chevaux réalisant un effort dans une piscine (Fregin et Nicholl, 1977 ; Thomas et al, 1980) ou sur une piste de course (McArdle et al, 1967 ; Marsland, 1968 ; Krzywanek et al, 1970 ; Hall et al, 1976). Mais c'est surtout l'emploi de tapis roulants à grande vitesse qui a permis une maîtrise et une standardisation parfaites de l'effort et qui a été à l'origine d'une progression rapide et réelle dans la compréhension des mécanismes de l'adaptation de l'organisme à l'effort (Bergsten, 1976 ; Thomas et Fregin, 1981 ; Persson, 1983). Ainsi, par exemple, l'augmentation du débit cardiaque, ainsi que les contributions relatives du volume systolique et de la fréquence cardiaque à cette augmentation, ont été depuis lors abondamment étudiées (Bergsten, 1976 ; Muir et al, 1976, Thomas et Fregin, 1981 ; Evans, 1985). Des techniques nouvelles basées sur l'utilisation de microsphères radioactives ont permis d'étudier la répartition du débit sanguin dans les différents tissus en fonction de l'intensité de l'exercice (Parks et Manohar, 1985). Il s'est avéré que lors d'exercices intenses, le débit sanguin musculaire du cheval atteint des valeurs de 160 ml/100 g, soit 2 fois plus que ce qui est évalué pour l'homme dans des conditions similaires (Saltin, 1985). Les adaptations à l'effort de la pompe cardiaque ont été également étudiées grâce à la mesure de pressions intravasculaires et intracardiaques (Bergsten, 1976 ; Bayly et al, 1983a ; Thomas et al, 1983). Les mesures de la pression intraventriculaire ont notamment permis d'extrapoler la vitesse maximale d'augmentation de pression (le rapport dp/dt_{max}) comme l'un des index les plus utilisés pour estimer la contractilité myocardique (Thomas et Fregin, 1981).

L'ensemble de ces recherches a mis en évidence la capacité exceptionnelle du cheval à augmenter le transport de l'O₂ des poumons vers le muscle pendant l'exercice, ainsi que l'extrême adaptabilité de ce système au cours de l'entraînement (Engelhardt, 1977; Physick-Sheard, 1985). Il a aussi été établi de façon indubitable que, pendant l'entraînement, la fréquence cardiaque diminue pour une vitesse donnée, même si la fréquence cardiaque maximale ne semble pas être modifiée (Foreman, 1984). La fréquence cardiaque aisément mesurable par télémétrie (Lekeux et al, 1982) ou grâce à des micro-enregistreurs placés sur le cheval (Evans et Rose, 1986) est donc actuellement un critère fiable d'appréciation de la condition physique (Fregin et Thomas, 1983 ; Persson, 1983). Enfin, il a été suggéré que, contrairement à l'homme (Bevegard et Shepherd, 1967), les performances du cheval sain ne semblent pas être limitées par son système cardio-vasculaire (Gillespie et Pascoe, 1983).

3.3. Le système respiratoire

Lors d'un travail musculaire important, le muscle squelettique peut multiplier l'intensité de ses processus métaboliques plus de 30 fois par rapport à son niveau de repos. De ce fait, la consommation d'O₂ et de substances énergétiques, ainsi que l'élimination de chaleur, de déchets métaboliques et d'anhydride carbonique (CO₂) sont multipliées dans la même proportion. L'aptitude à maintenir les équilibres internes indispensables à la continuation de l'activité dépend entièrement des organes qui assurent le fonctionnement des muscles. Cette dépendance est particulièrement nette pour les organes qui assurent les fonctions circulatoire et respiratoire, et qui s'efforcent de placer à chaque instant la cellule musculaire en contact indirect avec l'air ambiant. Cependant, même chez un athlète sain et entraîné, la capacité de fournir un effort d'intensité croissante atteint toujours une limite, l'individu atteignant alors le maximum de ses possibilités. A de rares exceptions près, le système respiratoire d'un athlète humain n'est pas limitatif lors d'un effort maximal ; par contre, il a été établi de longue date que le coeur était l'un des facteurs limitant la performance (Bevegard et Shepherd, 1967). De récentes recherches chez les équidés n'ont pu mettre en évidence une quelconque défaillance du système cardiaque, même chez des chevaux poussés au maximum de leurs possibilités (Gillespie et Pascoe, 1983 ; Parks et Manohar, 1983 ; Physick-Sheard, 1985 ; Rose et Evans, 1987).

Cependant, certains auteurs, se basant soit sur des raisonnements théoriques (Gillespie, 1975), soit sur des faits cliniques (Jeffcott et al, 1982), soit encore sur l'observation expérimentale qui montre que les possibilités de vasodilatation des vaisseaux diaphragmatiques étaient proches de leur maximum lors d'un effort intense (Manohar, 1986), avaient déjà suggéré que le fonctionnement optimal du système respiratoire est un élément clé dans la réalisation de performances de haut niveau et que ce système respiratoire pourrait présenter une limite lors de l'effort maximal. Au début des années 80, il a été démontré que des chevaux sains réalisant des efforts de forte intensité présentaient systématiquement une hypoxémie importante - diminution de la pression artérielle en O₂ de 100 mm Hg (au repos) à 60-70 mm Hg - ainsi qu'une hypercapnie (Bayly et al, 1983b). Ce phénomène traduisait une relative défaillance du système respiratoire à répondre de façon adéquate à une forte demande en O₂ de l'organisme. Cette découverte a, dès lors permis d'établir que le système respiratoire du cheval athlète,

même sain, était l'un des facteurs responsables de la limitation de la performance maximale. Depuis cette découverte, le système respiratoire du cheval a bénéficié de l'attention croissante des chercheurs.

Chacune des étapes du transit de l'O₂ peut limiter l'efficacité du système respiratoire : les muscles respiratoires (Manohar, 1986) et le système contrôlant leur activité (Bramble et Carrier, 1983), les facteurs mécaniques de la respiration, la perméabilité des voies respiratoires supérieures et/ou profondes, la disponibilité d'un nombre suffisant d'alvéoles fonctionnels, l'adéquation du rapport entre la ventilation et la perfusion des lobules pulmonaires, la diffusion de l'O₂ au travers de la membrane alvéolo-capillaire (Wagner et al, 1989).

L'étude de la fonction respiratoire en tant que facteur limitant l'effort a été entreprise récemment (Art, 1991). Il en résulte que les adaptations respiratoires à l'effort observées chez les équidés leur sont spécifiques et diffèrent en de nombreux points de celles rapportées pour le chien et pour l'homme. D'autre part, le fait que les poneys au trot augmentent, au-delà d'une certaine intensité d'exercice, leur ventilation par une augmentation de la fréquence respiratoire plutôt que du volume courant peut s'expliquer par leur faible compliance thoracique, par un éventuel rôle thermorégulateur de la ventilation et par une influence de la locomotion sur la respiration. Le présent travail a montré que, s'il existe en effet un couplage non constant entre la fréquence des foulées et de la respiration (Art et al, 1990b), il n'existe en revanche que peu d'interférence entre la stratégie respiratoire et les conditions atmosphériques, du moins dans des conditions qui ne sont pas extrêmes (Art et Lekeux, 1988).

L'augmentation spectaculaire de la résistance au cours de l'effort chez les équidés (Art et al, 1988) s'explique par les faits suivants :

- le cheval doit respirer par le nez et la résistance nasale est la source majeure de la résistance des voies aériennes supérieures ;
- les débits aériens de pointe sont très élevés et entraînent l'apparition de turbulences aériennes, notamment dans les grosses voies du tractus respiratoire ;
- les pressions fortement négatives régnant en cours d'inspiration dans les voies aériennes extrathoraciques sont suffisamment importantes pour induire un collapsus dynamique partiel de ces dernières et entraîner dès lors une diminution de leur surface de section et une augmentation de leur résistance à l'écoulement de l'air.

L'inertance pulmonaire est deux fois plus élevée chez les équidés que chez l'homme. Cette caractéristique, associée aux spécificités de l'adaptation de la fonction respiratoire à l'effort des équidés, a pour conséquence que, dans cette espèce, les pressions inertielles deviennent non négligeables (Art et al, 1989).

Au cours de l'effort, le travail mécanique de la respiration par minute augmente de façon exponentielle avec la ventilation. L'augmentation simultanée du travail élastique, mais aussi et surtout des travaux résistifs et inertiels expliquent largement ce phénomène (Art et Lekeux, 1989).

L'ensemble des observations reprises ci-dessus, le fait que la contribution relative du travail de la respiration à la consommation d'O₂ totale augmente exponentiellement avec la ventilation et enfin la mise en évidence chez le cheval, au cours d'un effort intense d'une corrélation

entre l'évolution des paramètres d'échange gazeux -notamment la chute de la pression partielle artérielle en O₂- et de mécanique ventilatoire, démontrent que les facteurs mécaniques pulmonaires peuvent limiter ou du moins contrarier toute augmentation ultérieure de la ventilation au cours de l'effort maximal. Or, cette hyperpnée est absolument indispensable pour compenser l'insuffisance des échanges gazeux. En effet, la très grande fréquence cardiaque observée chez les chevaux pendant l'effort (environ 220 cycles/min) réduit considérablement le temps de transit du sang dans les capillaires alvéolaires (environ 0.25 sec). Il en résulte une hypoxémie et une hypercapnie dont la correction par une hyperpnée compensatoire est sérieusement limitée chez le cheval par des contraintes liées à la mécanique ventilatoire (couplage respiration-locomotion, piston abdominal et thoracique, résistance à l'écoulement de l'air, fatigue du diaphragme, ...).

D'autre part, ce rôle limitant de la fonction respiratoire est encore aggravé par le fait que, contrairement à ce qui se passe au niveau des autres systèmes impliqués dans la physiologie de l'exercice, la capacité ventilatoire n'est guère améliorée par l'entraînement chez le cheval de sport (Art et al, 1993).

Par conséquent, la mécanique ventilatoire peut être considérée comme l'un des facteurs limitant la ventilation et donc la performance chez le cheval sain lors d'un effort maximal. Ce rôle limitant est évidemment d'autant plus vrai et plus crucial que le cheval souffre d'une insuffisance respiratoire, même subclinique.

Les techniques d'investigation utilisées dans les travaux décrits ci-dessus ont été parfaitement tolérées par l'ensemble des animaux. Elles peuvent donc être utilisées (1) pour une évaluation des capacités respiratoires des chevaux de sport, (2) pour la détection précoce des maladies respiratoires subcliniques induisant une intolérance à l'effort, (3) pour un suivi correct des animaux en convalescence de maladie respiratoire, ainsi que (4) pour une meilleure investigation des effets fonctionnels de certaines substances pharmacologiques.

4. CONCLUSION

Dans la majorité des disciplines équestres, la réalisation des performances nécessite un fonctionnement optimal de la chaîne de l'oxygène. Il est donc indispensable que chaque maillon de cette Chaîne fonctionne de façon appropriée. Le maillon le plus faible et le plus fréquemment déficient chez le cheval est le système respiratoire. Ce dernier constitue donc un facteur limitant de la performance, et ce d'autant plus que, contrairement aux autres maillons, il ne s'améliore guère avec l'entraînement. C'est pourquoi, chez tout cheval de sport, une attention toute particulière doit être portée sur la prévention, le diagnostic et le traitement des dysfonctions respiratoires.

5. BIBLIOGRAPHIE

AITKEN M.M., ANDERSON M.G., MACKENZE G., SANFORD J. Correlations between physiological and biochemical parameters used to assess fitness in the horse. *J. 5. Afr. Vet. Assoc.*, 1976, 45, 361-370.

AMORY H., ROLLIN F., DESMECHT D., LINDEN A., LEKEUX P. Cardiovascular response to acute hypoxia in double-muscléd calves. *Res. Vet. Sci.*, 1992, 52, 316-324.

- AMORY H., DESMECHT D.J.M., LINDEN A.S., Mc ENTEE K., ROLLIN F.A., BEDUIN J.M.L., GENICOT B.C., D'ORIO V., LEKEUX P.M. Comparison of cardiac function in double-muscled and conventional calves. *Am. J. Vet. Res.*, 1993, sous presse.
- ARCHER R.K. Haematology in relation to performance and potential. A general review. *J. S. Afr. Vet. Assoc.*, 1974, 45, 273-277.
- ART T., LEKEUX P. Effect of environmental temperature and relative humidity on breathing pattern and heart rate in ponies during and following a standardized exercise. *Vet. Rec.*, 1988, 122, 295-299.
- ART T., SERTEYN D., LEKEUX P. Effect of exercise on the partitioning of equine respiratory resistance. *Equine Vet. J.*, 1988, 20, 268-273.
- ART T., LEKEUX P. Work of breathing in exercising ponies. *Res. Vet. Sci.*, 1989, 46, 49-53.
- ART T., LEKEUX P., GUSTIN P., DESMECHT D., AMORY H., PAIVA M.: Inertance of the respiratory system in ponies. *J. Appl. Physiol.*, 1989, 65, 534-540.
- ART T., ANDERSON L., WOAKES A.J., ROBERTS C., BUTLER P.J., SNOW D.H., LEKEUX P. Mechanics of breathing during strenuous exercise in thoroughbred horses. *Respir. Physiol.*, 1990a, 82, 279-294.
- ART T., DESMECHT D., AMORY H., LEKEUX P. Synchronization of locomotor and respiratory cycles in trotting ponies. *J. Vet. Med. A*, 1990b, 37, 95-103.
- ART T. Etude de la mécanique ventilatoire en tant que facteur limitant de la ventilation au cours de l'effort chez les équidés. Thèse présentée en vue de l'obtention du grade d'Agrégée de l'Enseignement Supérieur, 1991.
- ART T., LEKEUX P. Training-induced modifications in cardiorespiratory and ventilatory measurements in Thoroughbred horses. *Equine Vet. J.*, 1993, in press.
- BAYLY W.M., GABEL A.A., BARR S.A. Cardiovascular effects of submaximal aerobic training on a treadmill in standardbred horses, using a standardized exercise test. *Am. J. Vet. Res.*, 1983a, 44, 544-553.
- BAYLY W.M., MEYERS K.M., KECK M.T., HUSTON L.J., GRANT B.D. Exercise-induced alterations in haemostasis in thoroughbred horses. In: *Equine Exercise Physiology*, Snow D.H., Persson S.G.B., Rose R.J. (Eds), Granta editions, Cambridge, 1983b, pp. 336-343.
- BAYLY W.M., SCHULZ D.A., HODGSON D.R., GOLLNICK P.D. Ventilatory responses of the horse to exercise: effect of gas collection systems. *J. Appl. Physiol.*, 1987, 63, 1210-1217.
- BERGSTEN G. Blood pressure, cardiac output, and blood gas tension in the horse at rest and during exercise. *Acta Vet. Scand. (suppl.)*, 1976, 48, 1-88.
- BEVEGARD B.S., SHEPHERD J.T. Regulation of the circulation during exercise in man. *Physiol. Rev.*, 1967, 47, 178-213.
- BOUCHER J.H., FERGUSON E.W., WILHELMSSEN C.L., STATHAM N., McMEEKIN R.R. Erythrocyte alterations during endurance exercise in horses. *J. Appl. Physiol.*, 1981, 51, 131-134.
- BOUCHER J.H. The equine spleen: source of dangerous blood cells. *J. Equine Vet. Sci.*, 1987, 7, 140-142.

- BRAMBLE D.M., CARRIER D.R. Running and breathing in mammals. *Science*, 1983, 219, 251-256.
- CARDINET G.H., FOWLER M.E., TYLER W.S. Heart rates and respiratory rates for evaluating performance in horses during endurance trail ride competition. *J. Am. Vet. Med. Assoc.*, 1963, 143, 1303-1309.
- ENGELHARDT W.v. Cardiovascular effects of exercise and training in horses. *Adv. Vet. Sci. Comp. Med.*, 1977, 21, 173-204.
- EVANS D.L. Cardiovascular adaptation to exercise and training. *Vet. Clin. North Am. Equine Pract.*, 1985, 1, 513-531.
- EVANS D.L., ROSE R.J. A method of investigation of the accuracy of four digitally displaying heart rate meters suitable for use in the exercising horse. *Equine Vet. J.*, 1986, 18, 129-132.
- EVANS D.L., ROSE R.J. Effect of a respiratory gas collection mask on some measurements of cardiovascular and respiratory function in horses exercising on a treadmill. *Res. Vet. Sci.*, 1988a, 44, 220-225.
- EVANS D.L., ROSE R.J. Determination and repeatability of maximum oxygen uptake and other cardiorespiratory measurements in the exercising horse. *Equine Vet. J.*, 1988b, 20, 94-98.
- FOREMAN J.H. Physiological responses of thoroughbred horses to conventional race training. M.S. Thesis, Washington State University, 1984.
- FREGIN G.F., NICHOLL T. Swimming: its influences on heart rate, respiration rate, and some hematological values in the horse. *J. Equine Med. Surg.*, 1977, 1, 288-293.
- FREGIN G.F., THOMAS D.P. Cardiovascular response to exercise in the horse. In: *Equine Exercise Physiology*, Snow D.H., Persson S.G.B., Rose R.J. (Eds), Granta editions, Cambridge, 1983, pp. 76-90.
- GILLESPIE J.R. The role of the respiratory system during exertion. *J. S. Afr. Vet. Assoc.*, 1975, 45, 305-309.
- GILLESPIE J.R., PASCOE J.R. Respiratory function in the exercising horse: a review. In: *Equine Exercise Physiology*, Snow D.H., Persson S.G.B., Rose R.J. (Eds), Granta editions, Cambridge, 1983, pp. 1-6.
- GROSS D.R., MUIR W.W., PIPERS F.S., HAMLIN R.L. Reevaluation of the equine heart score. *South-West Vet.*, 1974, 27, 231-233.
- HALL M.C., STEEL J.D., STEWART G.A. Cardiac monitoring during exercise tests in the horse. Part II. Heart rate responses to exercise. *Austr. Vet. J.*, 1976, 52, 1-5.
- HOPPELER H., MATHIEU O., KRAUER R., CLAASSEN H., ARMSTRONG R.B., WEIBEL E.R. Design of the mammalian respiratory system. VI. Distribution of mitochondria and capillaries in various muscles. *Respir. Physiol.*, 1981, 44, 87-111.
- JEFFCOTT L.B. Haematology in relation to performance and potential. 2. Some specific aspects. *J. S. Afr. Vet. Assoc.*, 1974, 45, 279-286.
- JEFFCOTT L.B., ROSSDALE P.D., FREESTONE J., FRANK C.J., TOWERSCLARK P.F. An assessment of wastage in Thoroughbred racing from conception to four years age. *Equine Vet. J.*, 1982, 14, 185-198.

- KARAS R.H., TAYLOR C.R., ROSLER K., HOPPELER H. Adaptive variation in the mammalian respiratory system in relation to energetic demand. V. Limits to oxygen transport by the circulation. *Respir. Physiol.*, 1987, 69, 65-79.
- KAYAR S.R., HOPPELER H., LINDSTEDT S.L., CLAASSEN H., JONES J.H., ESSEN-GUSTAVSSON B., TAYLOR C.R. Total muscle mitochondrial volume in relation to aerobic capacity of horses and steers. *Pflugers Arch.*, 1989, 413, 343-347.
- KRZYWANEK H., WITTKÉ G., BAYER A., PORMAN P. The heart rates of thoroughbred horses during a race. *Equine Vet. J.*, 1970, 2, 115-117.
- LEKEUX P., HENROTEAUX M., BIENFET V. Comparaison du type et de la fréquence relative des principales arythmies cardiaques observées chez les chevaux en fonction de leurs performances en course: une étude téléométrique. *Ann. Méd. Vét.*, 1982, 126, 205-208.
- LEKEUX P., ART T. Gas exchange in resting and exercising animals. In: *Pulmonary Function in Healthy, Exercising and Diseased Animals*, Lekeux, P., ed, V. D. T. Publications, Gand, 1993, pp. 93-122.
- MANOHAR M. Vasodilator reserve in respiratory muscles during maximal exertion in ponies. *J. Appl. Physiol.*, 1986, 60, 1571-1577.
- MARSLAND W.P. Heart rate response to submaximal exercise in the standardbred horse. *J. Appl. Physiol.*, 1968, 24, 98-101.
- McARDLE W.D., FOGLIA G.F., PATTI A.V. Telemetered cardiac response to selected running events. *J. Appl. Physiol.*, 1967, 22, 566-570.
- MOODIE E.W., SHEARD R.P. The use of electrocardiography to estimate health weight and predict performance in the racehorse. *Austr. Vet. J.*, 1980, 56, 557-558.
- MUIR W.W., SKARDA T.R., MILNE D.W. Estimation of the cardiac output in the horse by thermodilution techniques. *Am. J. Vet. Res.*, 1976, 37, 697-700.
- MUYLLE E., VAN DEN HENDE C., NUYTEN J., OYAERT W., VLAMINCK K. Preliminary studies on the relationship of red blood cell potassium concentration and performance. In: *Equine Exercise Physiology*, Snow D.H., Persson S.G.B., Rose R.J. (Eds), Granta editions, Cambridge, 1983, pp. 366-370.
- NIELSEN K., VIBE-PETERSEN G. Relationship between QRS-duration (Heart Score) and racing performance. *Equine Vet. J.*, 1980, 12, 81-84.
- PARKS C.M., MANOHAR M. Distribution of blood flow during moderate and strenuous exercise in ponies (*Equus Cabalus*). *Am. J. Vet. Res.*, 1983, 44, 1861-1866.
- PARKS C.M., MANOHAR M. Regional blood flow changes in response to near maximal exercise in ponies: a review. *Equine Vet. J.*, 1985, 17, 311-313.
- PERSSON S.G.B. On blood volume and working capacity in horses. *Acta Vet. Scand.* (Suppl.), 1967, 19, 1-189.
- PERSSON S.G.B. Value of haemoglobin determination in the horse. *Nord. Vet. Med.*, 1969, 21, 513-523.
- PERSSON S.G.B. Evaluation of exercise tolerance and fitness in the performance horse. In: *Equine Exercise Physiology*, Snow D.H., Persson S.G.B., Rose R.J. (Eds), Granta editions, Cambridge, 1983, pp. 441-457.

- PHYSIC-SHEARD P.W., HENDREN C.M. Heart score and the effect of excitement. *Equine Vet. J.*, 1983,15,145-148.
- PHYSIC-SHEARD P.W. Cardiovascular response to exercise and training in the horse. *Vet. Clin. North Am. Equine Pract.*, 1985,1, 383-417.
- ROSE R.J., EVANS D.L. Cardiovascular and respiratory function in the athletic horse. In: *Equine Exercise Physiology 2*, Gillespie J.R., Robinson N.E. (Eds.), ICEEP Publications, Davis, California, 1987, pp. 1-24.
- SALTIN B. Hemodynamic adaptations to exercise. *Am. J. Cardiol.*, 1985, 44, 42D-47D.
- SNOW D.H. Physiological factors affecting resting haematology. In: *Equine Exercise Physiology*, Snow D.H., Persson S.G.B., Rose R.J. (Eds), Granta editions, Cambridge, 1983, pp. 318-323.
- STAVAUX D., Mc ENTEE K., ART T., LEKEUX P. Effect of age and breed on muscle fibers type and capillary density in cattle. Soumis pour publication.
- STEEL J.B., STEWART G.A. Electrocardiography and racing performance. In: *Equine Medicine and Surgery*, 2nd Ed., Santa Barbara, American Veterinary Publications, 1972.
- STEWART G.A., STEEL J.D. Haematology of the fit race horse. *J. S. Afr. Vet. Assoc.*, 1974, 45, 287-291.
- TAYLOR C.R., WEIBEL E.R. Learning from comparative physiology. In: *The Lung: Scientific Foundations*, Crystal, R.G., West, J.B. (Eds), Raven Press, New York, 1991, pp. 1595-1607.
- THOMAS D.P., FREGIN G.F., GERBER N.H., AILES N.B. Cardiorespiratory adjustments to tethered-swimming in the horse. *Pflugers Arch.*, 1980, 385, 65-70.
- THOMAS D.P., FREGIN G.F. Cardiorespiratory and metabolic responses to treadmill exercise in the horse. *J. Appl. Physiol.*, 1981, 50, 864-868.
- THOMAS D.P., FREGIN G.F., GERBER N.H., AILES N.B. Effects of training on cardiorespiratory function in the horse. *Am. J. Physiol.*, 1983, 245, R160-R165.
- WAGNER P.D., GILLESPIE J.R., LANDGREN G.L., FEDDE M.R., JONES B.W., DEBOWES R.M., PIESCHL R.L., ERICKSON H.H. Mechanism of exercise-induced hypoxemia in horses. *J. Appl. Physiol.*, 1989, 66, 1227-1233.
- WAGNER P.D., HOPPELER H., SALTIN B. Determinants of maximal oxygen uptake. In: *The Lung: Scientific Foundations*, Crystal, R.G., West, J.B. (Eds), Raven Press, New York, 1991, pp. 1585-1593.
- WEIBEL E.R., TAYLOR C.R., KARAS R.H., HOPPELER H. Adaptive variation in the mammalian respiratory system in relation to energetic demand. I. Introduction to problem and strategy. *Respir. Physiol.*, 1987, 69,1-6.
- WOAKES A.J., BUTLER P.J., SNOW D.H. The measurement of respiratory airflow in exercising horses. In: *Equine Exercise Physiology 2*, J.R. Gillespie, N.E. Robinson (Editors), ICEEP Publications, Davis, California, 1987, pp. 194-205.
- ZUNT N. Praktische Folgerungen aus den am Arbeitspferd ausgeführten Stoffwechselforschungen. *Zschr. Vetkde*, 1896, 8, 293-311.