



HAL
open science

Caractérisation de la charge de travail du cheval de sport : étude expérimentale des liens entre paramètres physiologiques et biomécaniques

Victoire Moucheboeuf

► **To cite this version:**

Victoire Moucheboeuf. Caractérisation de la charge de travail du cheval de sport : étude expérimentale des liens entre paramètres physiologiques et biomécaniques. Médecine vétérinaire et santé animale. 2018. dumas-04882690

HAL Id: dumas-04882690

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04882690v1>

Submitted on 13 Jan 2025

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

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

Copyright

Année 2018



**CARACTÉRISATION DE LA CHARGE DE
TRAVAIL DU CHEVAL DE SPORT:
ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DES LIENS ENTRE
PARAMÈTRES PHYSIOLOGIQUES ET
BIOMÉCANIQUES**

THÈSE

Pour le

DOCTORAT VÉTÉRINAIRE

Présentée et soutenue publiquement devant

LA FACULTÉ DE MÉDECINE DE CRÉTEIL

le 16 janvier 2018
le.....

par

Victoire, Marie, Bénédicte MOUCHEBOEUF

JURY

Président : KOBEITER

Professeur à la Faculté de Médecine de CRÉTEIL

Membres

Directeur : Pr Fanny Pilot-Storck

Unité de physiologie, éthologie et génétique, Professeur

Assesseur : Pr Bénédicte Grimard-Ballif

Unité de zootechnie et économie rurale, Professeur

Invitée : Camille Saute

Cofondatrice et responsable R&D, Equisense

Liste des membres du corps enseignant

Directeur : M. le Professeur Degueurce Christophe

Directeurs honoraires : MM. les Professeurs : Cotard Jean-Pierre, Mialot Jean-Paul, Moraillon Robert, Parodi André-Laurent, Pilet Charles, Toma Bernard.
Professeurs émérites : Mme et MM. : Bénét Jean-Jacques, Chermette René, Combrisson Hélène, Courreau Jean-François, Deputte Bertrand, Niebauer Gert, Paragon Bernard, Poucheton Jean-Louis.

Département d'élevage et de pathologie des Équidés et des Carnivores (DEPEC)

Chef du département : Pr Grandjean Dominique - Adjoint : Pr Blot Stéphane

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Unité pédagogique de cardiologie - Pr Chetboul Valérie* - Dr Gkouni Vassiliki, Praticien hospitalier</p> <p>Unité pédagogique de clinique équine - Pr Audigé Fabrice - Dr Bertoni Lélia, Maître de conférences - Dr Bourzac Céline, Maître de conférences contractuelle - Dr Coudry Virginie, Praticien hospitalier - Pr Denoix Jean-Marie - Dr Giraudet Aude, Praticien hospitalier * - Dr Jacquet Sandrine, Praticien hospitalier - Dr Mespouhès-Rivière Céline, Praticien hospitalier - Dr Moiroud Claire, Praticien hospitalier</p> <p>Unité pédagogique de médecine interne - Dr Benckekroun Ghita, Maître de conférences - Pr Blot Stéphane* - Dr Canonne-Guibert Morgane Maître de conférences contractuelle - Dr Freiche-Legros Valérie, Praticien hospitalier - Dr Maurey-Guénec Christelle, Maître de conférences</p> <p>Discipline : imagerie médicale -</p> | <p>Unité pédagogique de médecine de l'élevage et du sport - Dr Cléro Delphine, Maître de conférences - Dr Fontbonne Alain, Maître de conférences - Pr Grandjean Dominique* - Dr Maenhoudt Cindy, Praticien hospitalier - Dr Nudelmann Nicolas, Maître de conférences</p> <p>Unité pédagogique de pathologie chirurgicale - Pr Fayolle Pascal - Dr Mailhac Jean-Marie, Maître de conférences - Dr Manassero Mathieu, Maître de conférences - Pr Moissonnier Pierre - Pr Viateau-Duval Véronique*</p> <p>Discipline : anesthésie, réanimation, urgences, soins intensifs - Dr Zilberstein Luca, Maître de conférences</p> <p>Discipline : ophtalmologie - Dr Chahory Sabine, Maître de conférences</p> <p>Discipline : nouveaux animaux de compagnie - Dr Pignon Charly, Praticien hospitalier</p> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Département des Productions Animales et de la Santé Publique (DPASP)

Chef du département : Pr Millemann Yves - Adjoint : Pr Dufour Barbara

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Unité pédagogique d'hygiène, qualité et sécurité des aliments - Pr Augustin Jean-Christophe - Dr Bolnot François, Maître de conférences * - Pr Carlier Vincent</p> <p>Unité pédagogique de maladies réglementées, zoonoses et épidémiologie - Pr Dufour Barbara* - Pr Haddad/Hoang-Xuan Nadia - Dr Praud Anne, Maître de conférences - Dr Rivière Julie, Maître de conférences</p> <p>Unité pédagogique de pathologie des animaux de production - Pr Adjou Karim* - Dr Belbis Guillaume, Maître de conférences - Dr Maxime Delsart, , Maître de conférences associé - Pr Millemann Yves - Dr Ravary-Plumioën Bérandère, Maître de conférences - Dr Plassard Vincent, Praticien hospitalier</p> | <p>Unité pédagogique de reproduction animale - Dr Constant Fabienne, Maître de conférences* - Dr Desbois Christophe, Maître de conférences (rattaché au DEPEC) - Dr El Bay Sarah, Praticien hospitalier - Dr Mauffré Vincent, Maître de conférences</p> <p>Unité pédagogique de zootechnie, économie rurale - Dr Arné Pascal, Maître de conférences - Pr Bossé Philippe* - Dr De Paula Reis Alline, Maître de conférences - Pr Grimard-Ballif Bénédicte - Dr Leroy-Barassin Isabelle, Maître de conférences - Pr Pontet Andrew - Dr Wolgust Valérie, Praticien hospitalier</p> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Département des sciences biologiques et pharmaceutiques (DSBP)

Chef du département : Pr Chateau Henry - Adjoint : Pr Pilot-Storck Fanny

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Unité pédagogique d'anatomie des animaux domestiques - Dr Boissady Emilie, Maître de conférences contractuelle - Pr Chateau Henry - Pr Crevier-Denoix Nathalie - Pr Robert Céline*</p> <p>Unité pédagogique de bactériologie, immunologie, virologie - Pr Boulois Henri-Jean* - Pr Eloit Marc - Dr Le Poder Sophie, Maître de conférences - Dr Le Roux Delphine, Maître de conférences</p> <p>Unité pédagogique de biochimie - Pr Bellier Sylvain* - Dr Lagrange Isabelle, Praticien hospitalier - Dr Michaux Jean-Michel, Maître de conférences</p> <p>Discipline : éducation physique et sportive - M. Philips Pascal, Professeur certifié</p> <p>Unité pédagogique d'histologie, anatomie pathologique - Dr Cordonnier-Lefort Nathalie, Maître de conférences - Pr Fontaine Jean-Jacques* - Dr Laloy Eve, Maître de conférences - Dr Reyes-Gomez Edouard, Maître de conférences</p> | <p>Unité pédagogique de management, communication, outils scientifiques - Mme Conan Muriel, Professeur certifié (Anglais) - Dr Desquilbet Loïc, Maître de conférences (Biostatistique, Epidémiologie) * - Dr Fournel Christelle, Maître de conférences contractuelle (Gestion et management) - Dr Marnignac Geneviève, Maître de conférences</p> <p>Unité de parasitologie, maladies parasitaires, dermatologie - Dr Blaga Radu, Maître de conférences (rattaché au DPASP) - Dr Cochet-Faivre Noëlle, Praticien hospitalier (rattachée au DEPEC) - Dr Darmon Céline, Maître de conférences contractuelle (rattachée au DEPEC) - Pr Guillot Jacques* - Dr Polack Bruno, Maître de conférences - Dr Risco-Castillo Verónica, Maître de conférences</p> <p>Unité pédagogique de pharmacie et toxicologie - Pr Enriquez Brigitte, - Dr Kohlhauer Mathias, Maître de conférences contractuel - Dr Perrot Sébastien, Maître de conférences * - Pr Tissier Renaud</p> <p>Unité pédagogique de physiologie, éthologie, génétique - Dr Chevallier Lucie, Maître de conférences (Génétique) - Dr Crépeaux Guillemette, Maître de conférences (Physiologie, Pharmacologie) - Dr Gilbert Caroline, Maître de conférences (Ethologie) - Pr Pilot-Storck Fanny (Physiologie, Pharmacologie) - Pr Tiret Laurent, (Physiologie, Pharmacologie) *</p> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

* responsable d'unité pédagogique

REMERCIEMENTS

Au Professeur
De la faculté de Médecine de Créteil,
Qui nous a fait l'honneur de présider ce jury de thèse.
Hommage respectueux.

À Madame le Professeur Fanny Pilot-Storck,
De l'École Nationale Vétérinaire d'Alfort,
Pour avoir encadré ce travail tout au long de sa réalisation,
Pour sa disponibilité, et ses conseils bienveillants,
Sincères remerciements.

À Madame le Professeur Bénédicte Grimard-Ballif,
De l'École Nationale Vétérinaire d'Alfort,
Qui a accepté d'être assesseur de thèse,
Pour sa rigueur avisée et sa patience,
Sincère reconnaissance.

À Mademoiselle Camille Saute,
Membre invitée en tant que Cofondatrice et Directrice scientifique d'Equisense,
Pour avoir été à l'origine de ce projet,
Pour sa confiance et son aide précieuse,
Qu'elle trouve ici l'expression de ma sincère reconnaissance.

À mes parents,
Pour cet amour dont vous m'avez toujours entourée,
Pour cette merveilleuse jeunesse que vous m'avez offerte.
Merci de m'avoir toujours soutenue et encouragée dans tous mes projets, ou presque !
Pour votre générosité sans limites et votre dévouement permanent à mon égard.
Vous êtes des parents exceptionnels.
Je vous aime tendrement.

À Constance et Pierre,
Ma petite-sœur et mon grand-frère bienveillants,
Merci d'être toujours là pour moi.
Malgré la distance vous occupez une très grande place dans mon cœur...

À Mélanie,
Ma future belle-sœur et consœur,
Pour m'avoir rassurée et montré la voie,
Car tous les obstacles sont faits pour être franchis,
Et que l'on peut toujours se relever même des pires chutes.
Merci pour ton soutien.

À toute l'équipe d'Equisense,
Pour son accueil plus que chaleureux,
Pour tous les bons moments passés ensemble à Lille,
Et notamment Mathieu, pour sa patience, sa disponibilité et son génie informatique.
Merci pour tout !

Aux écuries de la Posterie et d'Alexis Borrin,
Pour nous avoir permis de mener cette étude,
Pour ces merveilleux chevaux et leurs cavaliers passionnés,
Qui ont à cœur de toujours mieux pratiquer ce sport si addictif!
Sincère reconnaissance.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| TABLE DES FIGURES | 5 |
| LISTE DES TABLEAUX | 7 |
| INTRODUCTION | 11 |
| I REVUE BIBLIOGRAPHIQUE | 13 |
| 1 BASES DE LA PHYSIOLOGIE DU CHEVAL À L'EFFORT | 15 |
| 1.1 Métabolisme énergétique d'une cellule musculaire | 16 |
| 1.1.1 La molécule d'ATP, source d'énergie musculaire | 16 |
| 1.1.2 Les voies métaboliques anaérobies produisant de l'ATP | 16 |
| 1.1.3 Les voies métaboliques aérobies produisant de l'ATP | 17 |
| 1.1.4 Importance relative des voies métaboliques selon l'effort | 21 |
| 1.2 Métabolisme énergétique à l'échelle du muscle squelettique | 25 |
| 1.2.1 L'organisation des muscles squelettiques | 25 |
| 1.2.2 Typologie des fibres musculaires | 27 |
| 1.2.3 Variations de la composition des fibres musculaires | 30 |
| 2 ADAPTATIONS DES GRANDES FONCTIONS À L'EFFORT ET EF- FETS DE L'ENTRAÎNEMENT | 33 |
| 2.1 Adaptations cardiovasculaires | 33 |
| 2.1.1 Fréquence et débit cardiaques | 33 |
| 2.1.2 La pression sanguine | 35 |
| 2.1.3 La consommation d'oxygène | 36 |
| 2.2 Adaptations respiratoires | 37 |
| 2.2.1 Les deux stratégies ventilatoires | 37 |
| 2.2.2 Le facteur limitant de la physiologie de l'effort | 38 |
| 2.3 Adaptations hématologiques | 39 |
| 2.4 Thermorégulation au cours de l'effort | 40 |
| 2.4.1 Gains thermiques | 40 |
| 2.4.2 Les voies de dissipation de la chaleur | 42 |
| 2.4.3 Régulation | 44 |

| | | |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.4.4 | Effet de l'entraînement sur la sudation | 45 |
| 2.5 | Adaptations musculaires | 45 |
| 2.5.1 | Le type de fibres musculaires | 45 |
| 2.5.2 | Le volume des fibres musculaires | 46 |
| 3 | LES PARAMÈTRES D'APTITUDE SPORTIVE UTILISÉS LORS DU SUIVI DES CHEVAUX À L'ENTRAÎNEMENT | 49 |
| 3.1 | Vers une nouvelle gestion des chevaux de sport : les tests standardisés . . . | 49 |
| 3.1.1 | Appréciation de l'état de santé du cheval | 49 |
| 3.1.2 | Les tests d'effort | 51 |
| 3.1.3 | Sur tapis roulant ou sur piste ? | 52 |
| 3.2 | La fréquence cardiaque | 52 |
| 3.2.1 | Évolution de la fréquence cardiaque avec la vitesse | 52 |
| 3.2.2 | Effet de l'entraînement sur la fréquence cardiaque | 53 |
| 3.3 | La lactatémie | 55 |
| 3.3.1 | Définition | 55 |
| 3.3.2 | Lien entre lactate musculaire et lactate sanguin | 55 |
| 3.3.3 | Cinétique de l'acide lactique sanguin pendant l'effort | 57 |
| 3.3.4 | Clairance de l'acide lactique sanguin après l'effort | 58 |
| 3.3.5 | Variations de la cinétique de clairance des lactates | 60 |
| 3.3.6 | En pratique : mesure de la lactatémie au « pic » | 62 |
| 3.3.7 | Lien avec les performances | 63 |
| 3.4 | Les paramètres d'aptitude physique | 64 |
| 3.4.1 | Notion de seuils aérobie et anaérobie | 64 |
| 3.4.2 | Rapport vitesse/lactatémie : le paramètre V4 | 66 |
| 3.4.3 | Rapport vitesse/fréquence cardiaque : le paramètre V200 | 66 |
| 3.4.4 | Tables de V4 et V200 et indices de performance | 67 |
| 3.5 | Autres mesures de paramètres de terrain ou sur tapis roulant | 68 |
| 3.5.1 | Les enzymes musculaires | 69 |
| 3.5.2 | Hématologie et biochimie | 70 |
| 3.5.3 | Les gaz sanguins | 70 |
| 3.5.4 | L'électrocardiogramme | 71 |
| 3.5.5 | La VO ₂ max | 71 |
| 3.5.6 | Le cas du surentraînement | 71 |
| 4 | CHARGE DE TRAVAIL ET CAPTEUR <i>EQUISENSE MOTION</i> | 73 |
| 4.1 | La charge de travail, un paramètre complexe | 73 |
| 4.1.1 | Définitions : dépense énergétique, intensité et charge de travail . . . | 73 |
| 4.1.2 | Un paramètre clé pour la gestion des chevaux de sport | 76 |
| 4.2 | Études préalables sur la charge de travail chez le cheval de sport | 79 |

| | | |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.2.1 | Technique d'équitation et charge de travail | 79 |
| 4.2.2 | Effet du nombre de sauts sur la charge de travail | 82 |
| 4.2.3 | Qualité du sol, terrain, charge de travail | 83 |
| 4.2.4 | Effet de l'ajout d'une charge | 83 |
| 4.2.5 | Effet des conditions climatiques | 85 |
| 4.3 | Le capteur <i>Equisense Motion</i> | 86 |
| 4.3.1 | Les enjeux de la recherche et du développement chez Equisense | 86 |
| 4.3.2 | Une technologie centrée sur l'interaction cheval-cavalier | 87 |
| 4.3.3 | Les fonctionnalités du capteur <i>Equisense Motion</i> | 89 |
| 4.4 | Un objectif innovant : fournir une note de charge de travail pour chaque séance | 92 |

II ÉTUDE EXPÉRIMENTALE 95

5 MATÉRIEL ET MÉTHODES 97

| | | |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.1 | Effort faible <i>versus</i> effort intense | 97 |
| 5.1.1 | Choix parmi les paramètres ayant un impact sur la charge de travail | 97 |
| 5.1.2 | Effet supposé des transitions sur la charge de travail | 98 |
| 5.2 | Le protocole | 99 |
| 5.3 | Les chevaux | 100 |
| 5.3.1 | Chevaux de sport | 100 |
| 5.3.2 | Chevaux de loisirs | 100 |
| 5.4 | Conditions d'expérimentation | 101 |
| 5.4.1 | Terrains | 101 |
| 5.4.2 | Conditions météorologiques | 103 |
| 5.5 | Déroulement des protocoles | 103 |
| 5.5.1 | Détail du protocole contrôle et du protocole test | 103 |
| 5.5.2 | Randomisation | 104 |
| 5.6 | Méthode de mesure des paramètres physiologiques | 104 |
| 5.6.1 | Fréquence cardiaque | 104 |
| 5.6.2 | Lactatémie | 107 |
| 5.7 | Mesure de deux paramètres biomécaniques | 109 |
| 5.8 | Traitement des données | 109 |
| 5.8.1 | La fréquence cardiaque | 109 |
| 5.8.2 | Lactatémie | 110 |
| 5.8.3 | Cadence et rebond | 110 |
| 5.9 | Analyse statistique des données | 110 |

| | | |
|----------|-------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6 | RÉSULTATS | 111 |
| 6.1 | Paramètres physiologiques | 111 |
| 6.1.1 | Lactatémie | 111 |
| 6.1.2 | Fréquence cardiaque | 112 |
| 6.2 | Paramètres biomécaniques | 116 |
| 6.2.1 | Cadence | 116 |
| 6.2.2 | Rebond | 118 |
| 7 | DISCUSSION | 121 |
| 7.1 | Les forces du protocole | 121 |
| 7.2 | Les limites du protocole | 122 |
| 7.2.1 | Importance de l'effort demandé dans le protocole test "transitions" . | 122 |
| 7.2.2 | Nombre d'individus | 122 |
| 7.2.3 | Hétérogénéité des deux groupes de chevaux | 123 |
| 7.3 | Analyse des résultats | 124 |
| 7.3.1 | La lactatémie | 124 |
| 7.3.2 | La fréquence cardiaque | 125 |
| 7.3.3 | Les paramètres biomécaniques | 126 |
| 7.4 | Ouverture : vers un monde du cheval connecté | 128 |
| 7.4.1 | <i>Care</i> , le second produit d'Equisense, en développement | 128 |
| 7.4.2 | Connecter une écurie? | 130 |
| 7.4.3 | Comment intégrer le vétérinaire dans cette révolution numérique? . | 131 |
| 7.4.4 | À plus long terme : vers un <i>bigdata</i> du cheval | 132 |
| | CONCLUSION | 133 |
| | BIBLIOGRAPHIE | 135 |

LISTE DES FIGURES

| | | |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | Le capteur <i>Equisense Motion</i> (d'après "Equisense-Web")..... | 12 |
| 2 | Cheval de Concours de Saut d'Obstacles français (d'après "Fédération Française d'Équitation")..... | 15 |
| 3 | Les étapes de la glycolyse aérobie (d'après "Biologie et Multimédia")..... | 18 |
| 4 | Le cycle de Krebs (d'après "Biologie et Multimédia"). | 19 |
| 5 | Les différentes voies métaboliques productrices d'ATP (d'après "Biologie et Multimédia")..... | 20 |
| 6 | Cinétique d'intervention des voies métaboliques et leur puissance chez le cheval (Wolter, 1999)..... | 21 |
| 7 | Les différentes voies de synthèse de l'ATP lors de l'exercice musculaire (Art <i>et al.</i> , 2000). | 24 |
| 8 | Interventions des différentes voies de synthèse de l'ATP lors de l'exercice musculaire (Art <i>et al.</i> , 2000)..... | 25 |
| 9 | Structure d'un muscle squelettique (d'après "Université de Laval")..... | 26 |
| 10 | Coloration histo-enzymologique des fibres de type I et II (d'après "Histologie et Génétique")..... | 27 |
| 11 | Variation de la typologie dans différents muscles de chevaux de course (De-monceau <i>et al.</i> , 1993)..... | 30 |
| 12 | Participation relative des différentes voies métaboliques selon la discipline du cheval (Couroucé, 2004). | 31 |
| 13 | Mécanisme de Frank-Starling, liant le volume d'éjection systolique (tension systolique) au volume de remplissage cardiaque (Couroucé, 1993)..... | 34 |
| 14 | Consommation d'oxygène lors d'un exercice intense (Wilmore et Costil, 1998). | 36 |
| 15 | Mécanismes de transferts de chaleur pendant l'exercice (Hodgson, 2013). . | 44 |
| 16 | Relation entre la vitesse de course (V en m/s) et la fréquence cardiaque (HR) selon le niveau d'entraînement (Thornton, 1983). | 54 |
| 17 | Évolution exponentielle de la lactatémie en fonction de la vitesse selon le niveau d'entraînement (Thornton <i>et al.</i> , 1983). | 58 |
| 18 | Cinétique de la lactatémie (La) après un effort maximal ou supramaximal chez l'homme (Auvinet <i>et al.</i> , 1991b)..... | 59 |

| | | |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 19 | Cinétique des lactates sanguins chez des chevaux soumis à différentes vitesses d'exercice sur tapis roulant incliné à + 5° pendant 40 minutes (Marlin <i>et al.</i> , 1991). | 60 |
| 20 | Concentrations sanguines en lactates selon le niveau d'entraînement, avant et après un test à l'effort sur tapis roulant (Rainger <i>et al.</i> , 1994). | 61 |
| 21 | Évolution de la lactatémie et de la fréquence cardiaque en fonction de la vitesse et position des points V4 et V200 (Couroucé, 1993). | 65 |
| 22 | Les effets de l'exercice sur la concentration de créatine kinase (CK) plasmatique chez 4 chevaux (Anderson, 1975). | 69 |
| 23 | Effet d'une séance d'entraînement, récupération et performance (Rogers <i>et al.</i> , 2007). | 77 |
| 24 | Différentes stratégies d'entraînement, récupération et performance (ligne en pointillés) (Rogers <i>et al.</i> , 2007). | 78 |
| 25 | Position de la tête du cheval dans l'étude de Sloet van Oldruitenborgh <i>et al.</i> (2006). | 80 |
| 26 | Évolution de la fréquence cardiaque à l'effort en fonction du port de tête (Sloet van Oldruitenborgh <i>et al.</i> , 2006). | 81 |
| 27 | Évolution de la lactatémie à l'effort en fonction du port de tête (Sloet van Oldruitenborgh <i>et al.</i> , 2006). | 81 |
| 28 | <i>Rollkür</i> prononcé chez un cheval de dressage (d'après "Europe Dressage"). | 82 |
| 29 | Température rectale, fréquence respiratoire et fréquence cardiaque mesurées chez des Trotteurs à la récupération, après un effort standardisé selon les conditions climatiques (Art <i>et al.</i> , 1996). | 85 |
| 30 | Visualisation du capteur <i>Equisense Motion</i> (d'après "Equisense-Web"). | 87 |
| 31 | Les axes d'analyse du mouvement utilisés par <i>Equisense Motion</i> (d'après "Equisense-Web"). | 88 |
| 32 | Visuels de l'utilisation de l'application mobile <i>Equisense Motion</i> (d'après "Equisense-Web"). | 89 |
| 33 | Les indicateurs effectifs et à venir du capteur <i>Equisense Motion</i> (d'après "Equisense-Web"). | 92 |
| 34 | Cheval de loisir équipé pour le protocole test (source : Aglaé Jambart). | 99 |
| 35 | La carrière utilisée lors du protocole avec les chevaux de sport (source : Victoire Moucheboeuf). | 102 |
| 36 | Le manège utilisé lors du protocole avec les chevaux de loisirs (source : Victoire Moucheboeuf). | 102 |
| 37 | Placement des électrodes du Télévet 100 (KRUUSE) sur cheval nu (source : Victoire Moucheboeuf). | 105 |

| | | |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 38 | Le Télévet 100 (KRUUSE) mis en place sur cheval sellé (source : Victoire Moucheboeuf). | 106 |
| 39 | Lactatomètre en cours d'utilisation, avant la fermeture du capot et le décompte (source : Victoire Moucheboeuf). | 108 |
| 40 | Lactatomètre affichant la valeur la lactatémie après 60 secondes de lecture (source : Victoire Moucheboeuf). | 108 |
| 41 | La fréquence cardiaque en fonction du temps lors d'un protocole contrôle avec le logiciel Télévet (source : Victoire Moucheboeuf). | 109 |
| 42 | Lactatémie moyenne à chaque palier en fonction du type de protocole et du type de cheval. | 112 |
| 43 | Fréquence cardiaque en fonction du temps pour le cheval de loisir "NORTHERN" pendant les protocoles contrôle et test. | 113 |
| 44 | Fréquence cardiaque en fonction du temps pour le cheval de sport "BEST OF" pendant les protocoles contrôle et test. | 113 |
| 45 | FC moyenne au trot et au galop à chaque palier en fonction du type de protocole et du type de cheval. | 115 |
| 46 | Cadence moyenne au galop à chaque palier en fonction du type de protocole et du type de cheval. | 117 |
| 47 | Analyse de variance de la cadence moyenne au galop au palier 1 en fonction du type de cheval. | 118 |
| 48 | Rebond moyen au galop à chaque palier en fonction du type de protocole et du type de cheval. | 119 |
| 49 | Analyse de variance du rebond moyen au galop au palier 1 en fonction du type de cheval. | 120 |
| 50 | Dispositifs <i>Motion</i> , pour cheval au travail et <i>Care</i> , pour le cheval au repos (d'après "Equisense-Web"). | 128 |
| 51 | Design du dispositif <i>Care</i> (d'après "Equisense-Web"). | 129 |
| 52 | Exemple de visuels de l'application <i>Care</i> (d'après "Equisense-Web"). | 129 |
| 53 | Perspectives de connexions dans l'écurie de demain (d'après www.equisense.com , présentation AVEF). | 130 |
| 54 | Le champs des possibles à court terme dans le passage à l'ère du "cheval connecté" (d'après www.equisense.com). | 131 |

LISTE DES TABLEAUX

| | | |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1 | Origine principale de l'ATP selon l'intensité de l'exercice chez le cheval (José-Cunilleras et Hinchcliff, 2003)..... | 22 |
| 2 | Sources de production d'énergie et leurs caractéristiques (Crielaard, 1985). | 23 |
| 3 | Caractéristiques des différents types de fibres musculaires chez le cheval (Snow et Valberg, 1994). | 29 |
| 4 | Type de fibres musculaires en fonction de la race, en pourcentage du total (Lopez-Rivero, 1989). | 32 |
| 5 | Évolution de la VO ₂ max en fonction de l'entraînement (Evans et Rose, 1987). | 37 |
| 6 | Illustration des variations de l'hématocrite chez le cheval en fonction de l'exercice (Rose <i>et al.</i> , 1987). | 40 |
| 7 | Chaleur métabolique et augmentation théorique de la température centrale en fonction du type d'effort (Franklin, 2016). | 41 |
| 8 | Pertes électrolytiques dans la sueur hypertonique des chevaux (Carlsoln, 1975)..... | 43 |
| 9 | Influence de l'entraînement sur le pourcentage de distribution des différents types de fibres chez cinq trotteurs de 2 ans (Henckel, 1983)..... | 45 |
| 10 | Intervalles de référence en hématologie et biochimie sanguine chez le cheval Pur-sang (Desjardins et Cadore, 2006). | 50 |
| 11 | Synthèse bibliographique des concentrations sanguines maximales en acide lactique chez le Pur-Sang et le Trotteur après l'effort. | 63 |
| 12 | Valeurs moyennes et intervalles de confiance à 5 % de V ₄ et V ₂₀₀ à différents âges et états d'entraînement, calculées chez 194 trotteurs français réalisant 1105 tests d'efforts standardisés sur une piste d'une longueur de 720 m (Couroucé <i>et al.</i> , 2002). | 68 |
| 13 | Bilan des différents indicateurs d'intensité du travail selon les auteurs. | 75 |
| 14 | Recensement des paramètres susceptibles d'influencer la charge de travail pour l'équipe d'Equisense. | 98 |
| 15 | Présentation des effectifs recrutés. | 101 |
| 16 | Récapitulatif des protocoles test et contrôle : comparaison du nombre de répétitions des séquences pas-trot-galop et du nombre de transitions. | 104 |

| | | |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 17 | Moyennes et écart-types des lactatémies obtenues à chaque palier, arrondis à la première décimale, en mmol/l. | 111 |
| 18 | Moyennes et écart-types des FC obtenues à chaque palier, au trot et au galop, arrondis à la première décimale, en battements par minute. | 114 |
| 19 | Moyennes et écart-types des cadences obtenues au galop à chaque palier, arrondis à la première décimale (en foulées/min). | 116 |
| 20 | Moyennes et écart-types des rebonds obtenus au galop à chaque palier, arrondis à la première décimale (en cm). | 119 |

INTRODUCTION

Le monde des objets connectés est en pleine expansion depuis quelques années déjà et les chiffres annoncés pour 2020 font état de 30 milliards d'objets connectés dans le monde d'après "le Portail des Statistiques". Les objets connectés sont des objets électroniques capables de récolter des données en temps réel et de les traduire en informations (chiffres, sons ou images) délivrées sur un ordinateur, une tablette ou un smartphone. Ces objets sont utilisés dans toutes sortes de domaines : santé, transports, entreprises, loisirs mais surtout, pour le grand public, dans le domaine du sport, avec en particulier les petits boîtiers qui comptabilisent le chemin parcouru, les calories brûlées en course à pied ou à vélo. Si la filière équine a déjà amorcé une phase de mutation de ses équipements depuis une dizaine d'années, le milieu équestre reste très isolé par rapport à ces avancées technologiques, malgré des passionnés très demandeurs de nouveaux outils. En effet, la plupart des cavaliers ont grandi avec les technologies numériques et toutes générations confondues, ils n'ont de cesse de mieux relever les défis d'un sport très technique, aussi bien dans la pratique que dans la gestion au quotidien de cet être complexe qu'est le cheval.

D'après les chiffres en ligne de l'Institut Français du Cheval et de l'Équitation ("IFCE") l'importance de l'équitation en France est sans équivoque. Il ne s'agit pas moins que du troisième sport national avec environ 700 000 cavaliers licenciés. Les activités équestres se pratiquent dans plus de 8 000 structures qui emploient plus de 17 000 personnes. Par ailleurs, la compétition équestre concerne 1 cavalier sur 5 et 120 000 chevaux, les autres pratiquant l'équitation uniquement pour se faire plaisir sans nécessairement rechercher de performance. Pour la seule année 2016, 118 508 épreuves officielles ont été recensées, surtout en Concours de Saut d'Obstacles.

C'est à partir de ce constat que la start-up Equisense a vu le jour en 2015, avec pour objectif d'améliorer le bien-être du cheval et d'optimiser son travail en harmonie avec le cavalier, en prévention de toute anomalie, comme expliqué sur le site internet "Equisense" (Figure 1). Basée à Lille, elle compte aujourd'hui vingt personnes et entraîne déjà de nouvelles start-up dans son sillage. Leur premier produit, *Equisense Motion*, est un capteur connecté qui se place sous la sangle, destiné à objectiver les caractéristiques biomécaniques d'une séance. Dans le cadre du développement de ce capteur, l'équipe de recherche et développement s'intéresse à l'estimation de la charge de travail du cheval lors d'une séance donnée pour aider les cavaliers à prendre conscience de ce qui est imposé à leur monture et suivre ce paramètre au quotidien pour préparer au mieux les échéances. Il a en effet été mis en évidence que le sous-entraînement, en particulier, mais aussi le surentraînement, étaient à l'origine de contre-performances, voire de blessures.

De nombreuses études ont été publiées sur l'évaluation de la charge de travail, mettant en relation des paramètres biomécaniques et physiologiques. L'objectif d'Equisense est d'explorer l'influence de paramètres mesurables par le capteur sur la réponse physiologique du cheval à l'effort afin de proposer aux cavaliers de se référer à une jauge de charge de travail à l'issue de leur séance. Le cavalier peut avoir un ressenti, et le recul de l'expérience pour évaluer l'intensité du travail effectué mais l'accès à une quantification objective est un outil précieux. L'humain a conscience de l'effort qu'il fournit, mais "ce n'est pas lui qui court!".

Après quelques rappels de la physiologie de l'effort chez l'athlète équin, le déroulement de l'étude expérimentale et les résultats obtenus seront exposés. Une analyse critique des points d'intérêt sera présentée dans une dernière partie.

FIGURE 1 – Le capteur *Equisense Motion* (d'après "Equisense-Web").



PREMIÈRE PARTIE

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

1. BASES DE LA PHYSIOLOGIE DU CHEVAL À L'EFFORT

L'effort physique est un travail fourni par l'organisme, qui nécessite la mobilisation des systèmes locomoteur, cardiovasculaire et respiratoire. L'ensemble de ces systèmes a un besoin commun pour fonctionner : l'énergie. Nous présenterons donc d'abord les différentes voies énergétiques dont le fonctionnement échelonné permet la réalisation de l'effort et son maintien dans la durée. Enfin, nous présenterons les caractéristiques fonctionnelles et typologiques du muscle strié squelettique, effecteur indispensable du mouvement, en particulier chez l'athlète équin, dont l'appareil locomoteur est très sollicité (Figure 2).

FIGURE 2 – Cheval de Concours de Saut d'Obstacles français (d'après "Fédération Française d'Équitation").



1.1 Métabolisme énergétique d'une cellule musculaire

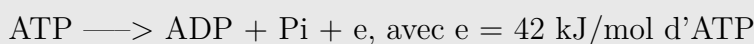
1.1.1 La molécule d'ATP, source d'énergie musculaire

Il existe trois formes de travail biologique, d'après "Université de Laval" :

- le **travail chimique**, qui consiste en la biosynthèse des molécules cellulaires ;
- le **travail mécanique**, c'est-à-dire la contraction musculaire ;
- le **transport**, soit le transfert de substances entre cellules.

Toute l'énergie nécessaire à ces trois travaux provient de l'hydrolyse de l'ATP (Adénosine TriPhosphate), vecteur intracellulaire universel d'énergie.

Formule de la réaction chimique :



La rupture de la liaison à haute énergie entre les groupements phosphate permet la contraction musculaire. Cependant, la concentration musculaire en ATP étant limitée à 6 mmol/kg de muscle (McMicken, 1983), elle ne permet qu'une brève durée de contraction (2 à 3 secondes d'exercice maximal). L'ADP formé est très rapidement rephosphorylé pour régénérer la molécule d'ATP. Ce renouvellement d'ATP peut être réalisé en présence ou en absence de dioxygène. De ce fait, on distingue deux grandes voies énergétiques, qui se relaient dans le temps pour assurer la continuité d'un effort une fois celui-ci commencé. La compréhension des voies par lesquelles l'énergie est libérée est un prérequis à l'étude de la réponse du cheval à l'exercice.

Les substrats majeurs utilisés pour la production d'énergie sont les glucides et les lipides, stockés dans les secteurs intracellulaires et extracellulaires (Bayly, 1983). Les sources intracellulaires d'énergie sont sous forme de glycogène et de triglycérides alors que les carburants d'origine extra-musculaire sont apportés aux muscles par le sang depuis les stocks périphériques : le glucose provient du glycogène des muscles et du foie, et les acides gras libres, du tissu adipeux. Il existe quatre systèmes par lesquels la molécule d'ATP est mise à disposition des cellules musculaires.

1.1.2 Les voies métaboliques anaérobies produisant de l'ATP

Le métabolisme anaérobie alactique

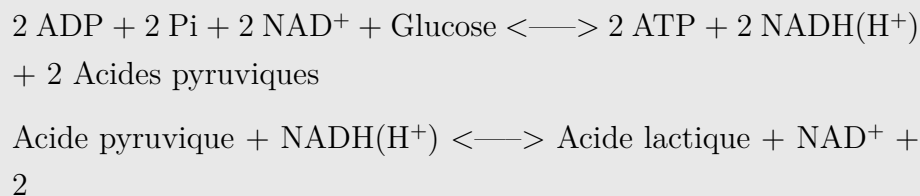
Une fois les faibles réserves musculaires en ATP utilisées, celle-ci est d'abord renouvelée grâce à la voie anaérobie alactique ou système des phosphagènes. Il s'agit de la voie anaérobie la plus simple. Elle permet de reconstituer de l'ATP à partir de la déphosphorylation de la créatine-phosphate en créatine, réaction qui libère 77 kilojoules par molécule

de créatine-phosphate. Cette source d'énergie est rapide car la créatine-phosphate est puisée directement dans les cellules musculaires mais l'épuisement des stocks, associé à l'accumulation de créatine, intervient dès 20 secondes d'exercice intense (Lovell *et al*, 1987).

Le métabolisme anaérobie lactique

La glycolyse anaérobie est une série de réactions enzymatiques distinctes consistant en la production d'acide pyruvique et d'ATP à partir du glycogène musculaire et du glucose circulant. L'acide pyruvique est nécessairement transformé en acide lactique de façon réversible par la lactate déshydrogénase (LDH). L'énergie libérée est relativement faible car seulement 2 molécules d'ATP sont synthétisées à partir d'une molécule glucidique, mais celles-ci sont disponibles rapidement pour la contraction musculaire. Cette voie débute 30 secondes après le début de l'exercice et elle est d'autant plus intense que la teneur du muscle en ATP est faible.

Formule de la réaction chimique :



L'accumulation de l'acide lactique dans les muscles provoque une acidose qui inhibe l'activité des principales enzymes de la glycolyse et gêne le fonctionnement des protéines contractiles (Monod et Flandrois, 1985). Cependant, il diffuse du muscle vers les fluides interstitiels et la circulation puis participe à la néoglucogenèse dans le foie, le rein et les muscles (Rieu, 1987), et aux mécanismes aérobie après réoxydation en pyruvate (Brooks, 1985 et 1991). Le lactate est donc à la fois une source potentielle d'énergie et un métabolite toxique au vu de son rôle acidifiant.

1.1.3 Les voies métaboliques aérobies produisant de l'ATP

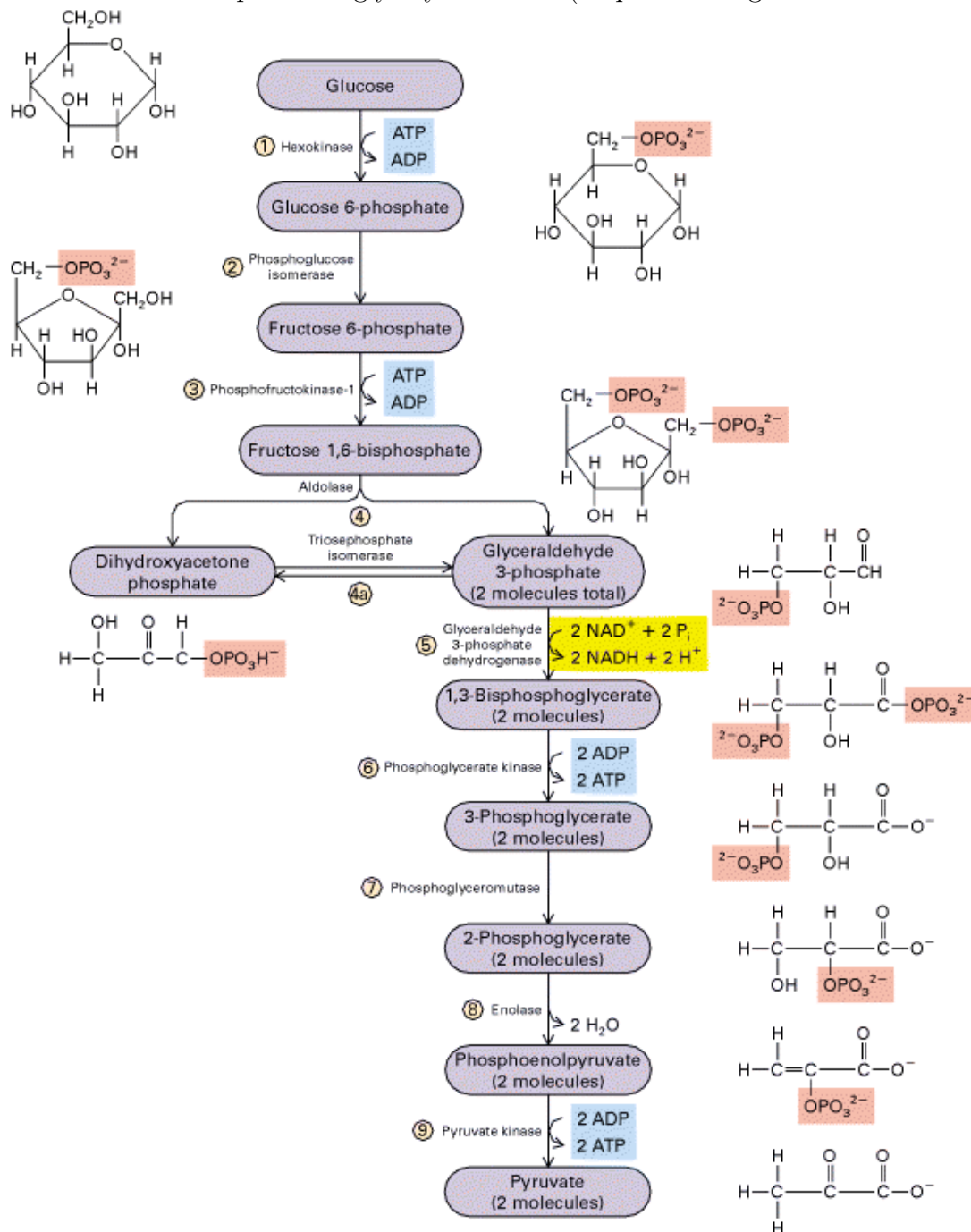
La source majeure d'ATP dans la cellule musculaire provient de l'oxydation des lipides et des glucides. En présence de dioxygène apporté par la circulation, d'après "Université de Laval", les substrats sont utilisés plus efficacement mais plus lentement que dans les voies anaérobies, car les réactions chimiques sont plus complexes et leur vitesse dépend du délai d'approvisionnement des cellules en oxygène par le système cardio-vasculaire. Une molécule de glucose est complètement dégradée en CO₂ et H₂O, et libère 38 molécules d'ATP.

Cette réaction comprend trois étapes distinctes : la glycolyse aérobie dans le cytoplasme puis le cycle de Krebs et le système de transport d'électrons dans la mitochondrie.

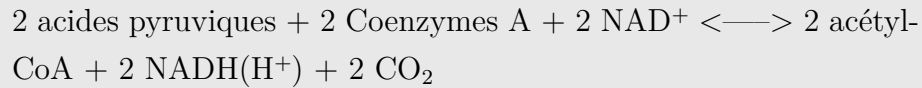
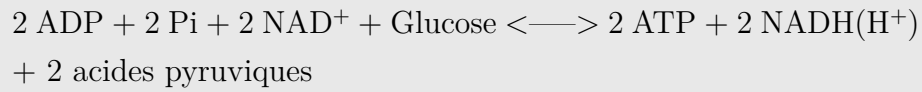
La glycolyse aérobie

Nous observons que la glycolyse aérobie commence par la même étape que la glycolyse aérobie, dans le cytosol (Figure 3). En revanche, en présence de d'oxygène, les deux molécules d'acide pyruvique sont ensuite transformées en acétylCoenzyme A (acétyl-CoA) par décarboxylation oxydative intra-mitochondriale ("Biologie et Multimédia").

FIGURE 3 – Les étapes de la glycolyse aérobie (d'après "Biologie et Multimédia").



Formule de la réaction chimique :

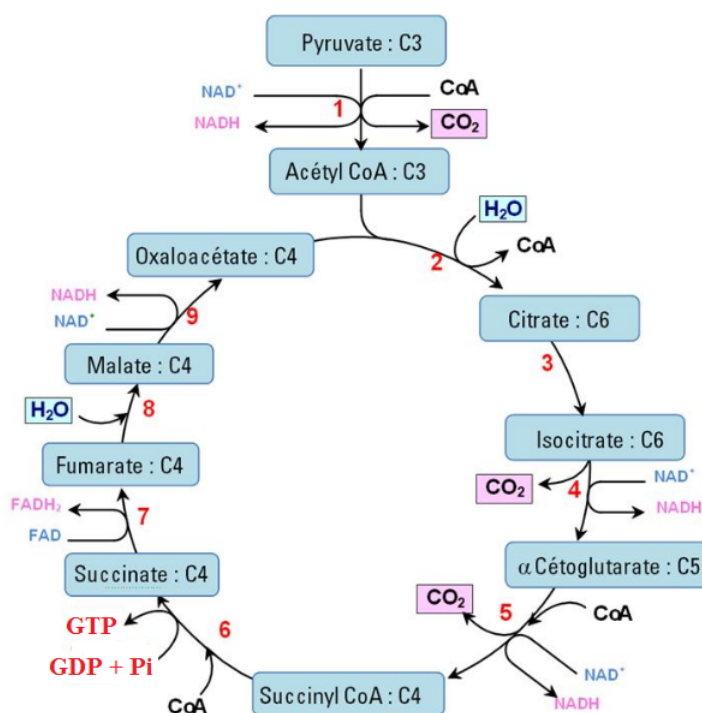


Les NADH(H⁺) produits ont un fort pouvoir réducteur. Leur oxydation grâce au système transporteur d'électrons mitochondrial produit produit 3 ATP par NADH. L'acide pyruvique est alors complètement oxydé en CO₂ et H₂O dans le cycle de Krebs.

Le cycle de Krebs

Il s'agit d'une série de réactions qui conduisent, à partir d'une molécule d'acétyl-CoA, à la production de 2 CO₂, 3 NADH(H⁺), 1 FADH₂, 1 GTP, et 1 Coenzyme A (Figure 4). Or l'oxydation des coenzymes réduits NADH(H⁺), FADH₂ et GTP entraîne respectivement la production de 3, 2 et 1 molécules d'ATP. Le bilan est donc que pour une molécule d'acétyl-CoA rentrant dans le cycle, 12 molécules d'ATP sont produites ("Université de Laval").

FIGURE 4 – Le cycle de Krebs (d'après "Biologie et Multimédia").

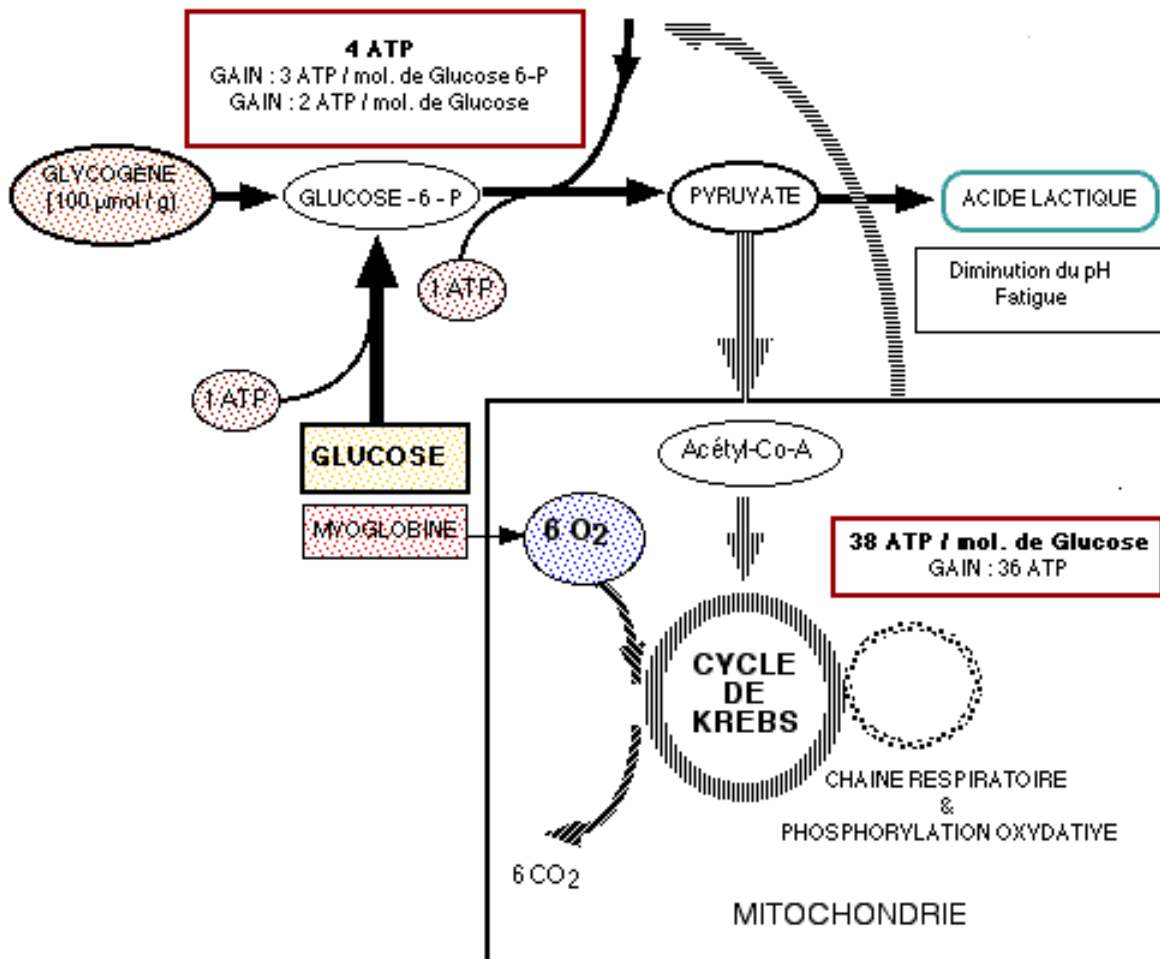


L'oxydation des acides gras et du glycérol

Une molécule de triglycéride est hydrolysée en 1 glycérol et 3 acides gras et, en présence d'oxygène, leur dégradation conduit à 460 molécules d'ATP. Comme dans le cas de la glycolyse aérobie, l'énergie produite par cette voie n'est pas disponible dans les premiers instants de la contraction musculaire et dépend de l'apport en oxygène de la cellule musculaire ("Université de Laval"). Le glycérol intervient dans la glycolyse tandis que les fragments d'acides gras (acétyl-CoA issus de la bêta-oxydation) entrent dans le cycle de Krebs. Les atomes d'hydrogène libérés au cours de ces réactions sont oxydés dans la chaîne de transport des électrons des mitochondries. Ainsi, pour une molécule de glycérol, on obtient 6 molécules de CO₂ et 38 molécules d'ATP, soit 1596 kJ. Voici en bilan, les différentes voies métaboliques productrices d'ATP représentées sur la figure 5.

FIGURE 5 – Les différentes voies métaboliques productrices d'ATP (d'après "Biologie et Multimédia").

ATP : Adénosine TriPhosphate; mol : molécule.



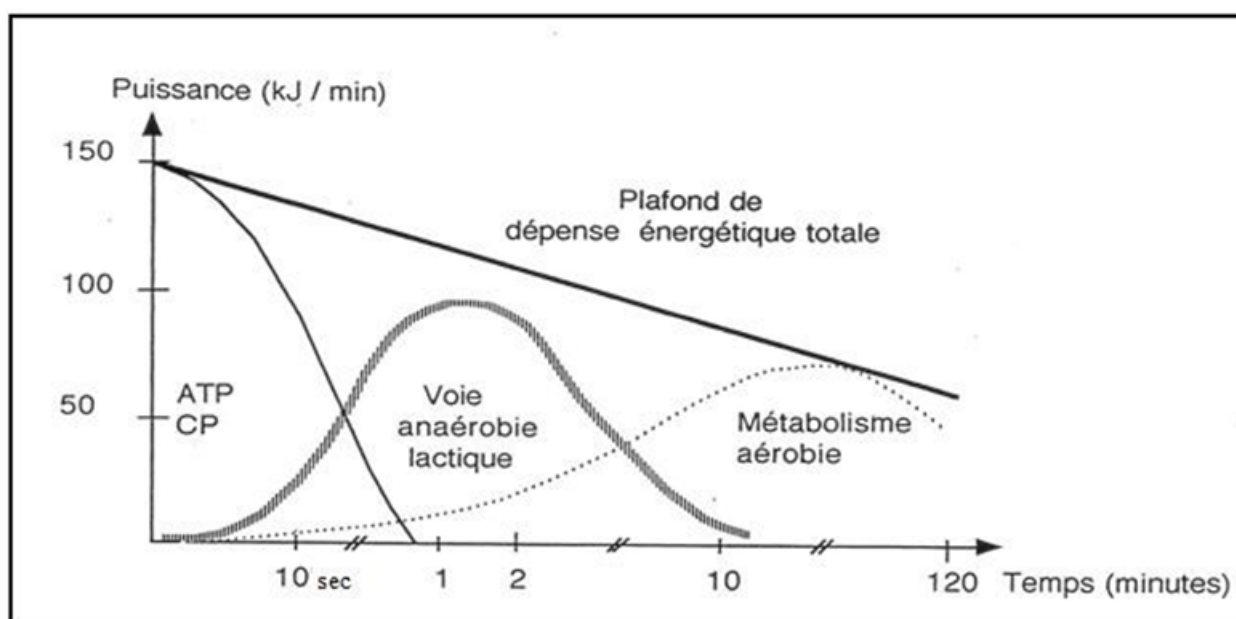
1.1.4 Importance relative des voies métaboliques selon l'effort

Délai d'intervention et facteurs limitants

La figure 6 présente la cinétique d'intervention des différentes voies énergétiques.

FIGURE 6 – Cinétique d'intervention des voies métaboliques et leur puissance chez le cheval (Wolter, 1999).

ATP : Adénosine TriPhosphate; CP : Créatine-Phosphate.



Lorsque l'effort débute, la source immédiate d'énergie est l'**ATP**, mais elle doit être synthétisée continuellement en raison de sa faible quantité stockée dans la cellule. Le second substrat disponible est la **créatine-phosphate**, au délai d'épuisement très court aussi. Le relais est ensuite pris par la **glycolyse anaérobie** qui intervient au bout de 30 secondes environ. Il s'agit du temps nécessaire au déclenchement des différentes réactions biochimiques. Enfin, le **métabolisme oxydatif**, plus lent, se met en place après 2 à 4 minutes d'exercice. Celui-ci dépend directement de la consommation en oxygène, qui ne peut pas indéfiniment augmenter (Wolter, 1999).

Cela n'est pas représenté sur la figure 6 mais lorsque la consommation maximale en O_2 appelée VO_2 max est atteinte et que la quantité d'oxygène disponible ne suffit plus, la voie anaérobie lactique est à nouveau sollicitée pour assurer la poursuite de l'effort physique. Le facteur limitant celle-ci est principalement l'accumulation de l'acide lactique dans le sang et les muscles, qui entraîne une inhibition de l'activité enzymatique musculaire et donc l'impossibilité de continuer l'exercice. Le tableau 1 indique cette fois en fonction de la VO_2 max quelles sont les voies qui fournissent majoritairement l'énergie et à partir de quels substrats.

TABLEAU 1 – Origine principale de l'ATP selon l'intensité de l'exercice chez le cheval (José-Cunilleras et Hinchcliff, 2003).

VO₂ max : consommation maximale d'oxygène (en ml/min/kg).

| Intensité de l'exercice | Consommation maximale d'O ₂ (% de la VO ₂ max) | Origine de l'énergie fournie |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Faible | 25 % | bêta-oxydation des acides gras |
| Modérée | 35 % | 40 % bêta-oxydation 60 % oxydation des glucides |
| Moyenne | 60 % | 25 % bêta-oxydation 75 % oxydation des glucides |
| Importante | > 60 % | Activation de la voie anaérobie Production de lactates |

Puissance de chaque filière

La capacité étant la quantité globale d'énergie disponible pour le sujet, la puissance représente la vitesse d'utilisation de la capacité. L'importance relative de chaque voie dépend aussi de l'intensité de l'exercice (Galloux, 2011).

- Les **exercices de courte durée et d'intensité élevée**, soit de type sprint, sollicitent majoritairement le système anaérobie car l'énergie doit être immédiatement disponible pour la cellule musculaire et la puissance requise est importante. Acide lactique et créatine s'accumulent alors dans la cellule.
- Les **exercices prolongés et d'intensité modérée ou faible** sollicitent quant à eux principalement le système aérobie qui permet un apport d'ATP beaucoup plus important et ne produit pas d'acide lactique. La contribution des systèmes anaérobies n'est nécessaire qu'en début d'exercice lorsque l'approvisionnement en oxygène de la cellule est encore insuffisant. Cet épisode produit des lactates dits "précoces" rapidement réutilisés. En effet, la LDH n'a pas l'inertie de mise en route des enzymes aérobies et le pyruvate est soumis à une glycolyse anaérobie.

Le tableau 2 récapitule les caractéristiques des trois voies métaboliques principales, qui expliquent leur répartition dans le temps au cours de l'effort. La puissance associée et donc le type d'exercice qu'elles favorisent sont également indiqués.

TABLEAU 2 – Sources de production d'énergie et leurs caractéristiques (Crielaard, 1985).

VO₂ max : consommation maximale d'oxygène (en ml/min/kg) ;

(*) Dépend des caractéristiques individuelles et du niveau d'entraînement ;

(1) Sportifs spécialisés dans les activités intenses de courte durée (sprint, saut...) ;

(2) Idem mais sur des durées plus longues.

| Caractéristiques | Anaérobie alactique | Anaérobie lactique | Aérobie |
|------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Substrats utilisés | ATP, créatine-phosphate | Glycogène, glucose | Glucides, lipides protéines |
| Délai d'intervention | Nul | 20-30 s | 2-4 min |
| Puissance ou débit maximal d'énergie | Très élevée 400 à 750 kJ/min (*) | Elevée 200 à 500 kJ/min (*) | Dépend de la VO ₂ max 60 à 120 kJ/min |
| Maintien puissance | 7-10 s (*) | 30-50 s (*) | 3-15 min (*) |
| Capacité ou quantité totale d'énergie | Très faible 30-50 kJ (*) (1) | Faible 95-120 kJ (*) (2) | Très élevée, dépend du % de VO ₂ |
| Lieu de production dans la cellule | Cytosol | Cytosol | Mitochondrie |
| Facteurs limitants | Epuisement des réserves | Acide lactique, baisse du pH cellulaire | VO ₂ max, épuisement du glycogène, thermolyse |
| Produit final | ADP, AMP et créatinine | Acide lactique | Eau et gaz carbonique |
| Récupération après sollicitation | Réserves reconstituées en ATP et CP en 2 min | Lactates éliminés en 1 h | Glycogène reconstitué en 24 h |

Ci-dessous, en bilan, les figures 7 et 8 permettent une visualisation des caractéristiques de chaque voie et de leur importance relative au cours de l'effort.

La cellule musculaire est différenciée pour la conversion d'énergie chimique (l'ATP), en énergie mécanique, c'est-à-dire le mouvement. Les voies métaboliques anaérobie alactique, anaérobie lactique et aérobie utilisent comme substrats des molécules différentes (glucides ou lipides) mais toutes convergent vers la production d'ATP. Ces voies sont recrutées successivement en fonction de la durée et de l'intensité de l'effort.

FIGURE 7 – Les différentes voies de synthèse de l'ATP lors de l'exercice musculaire (Art *et al.*, 2000).

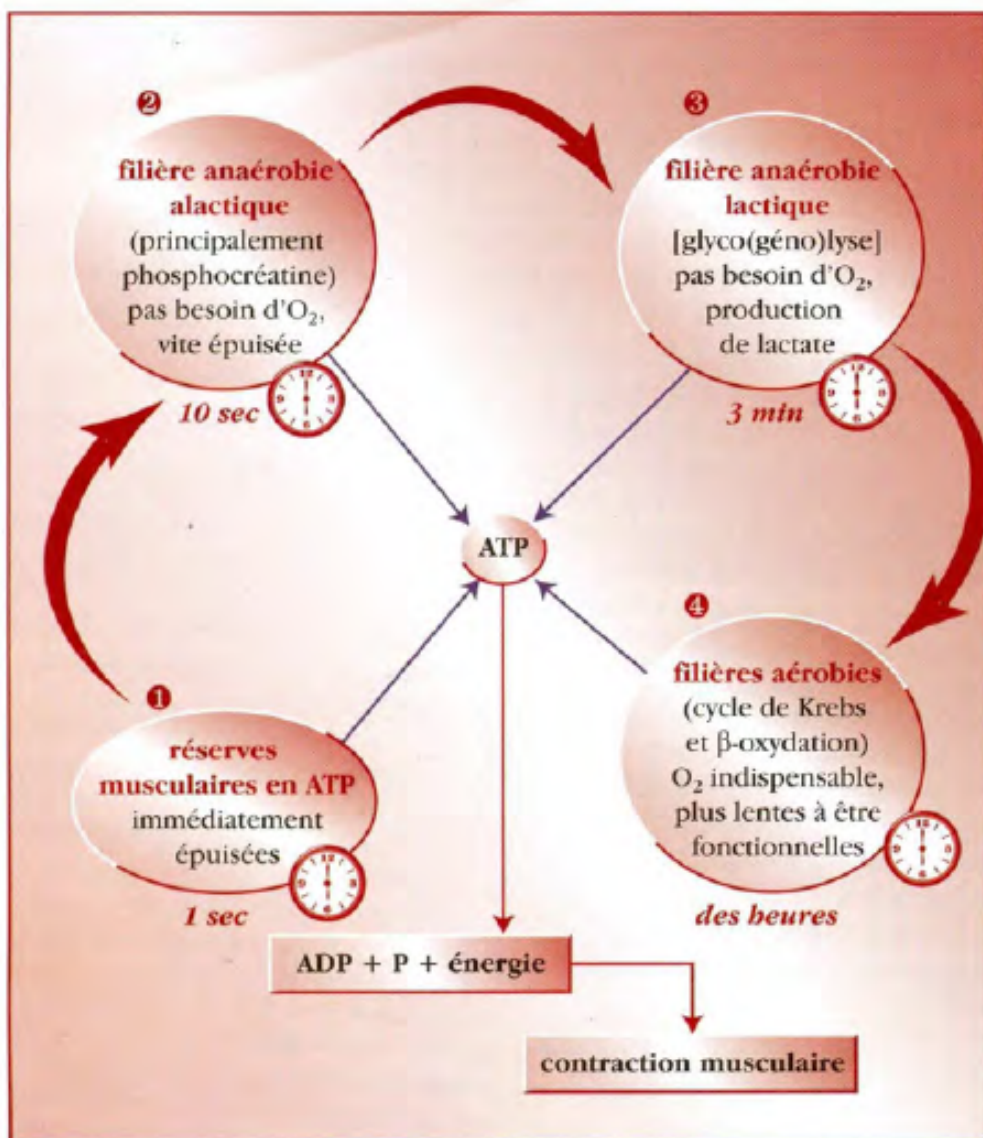
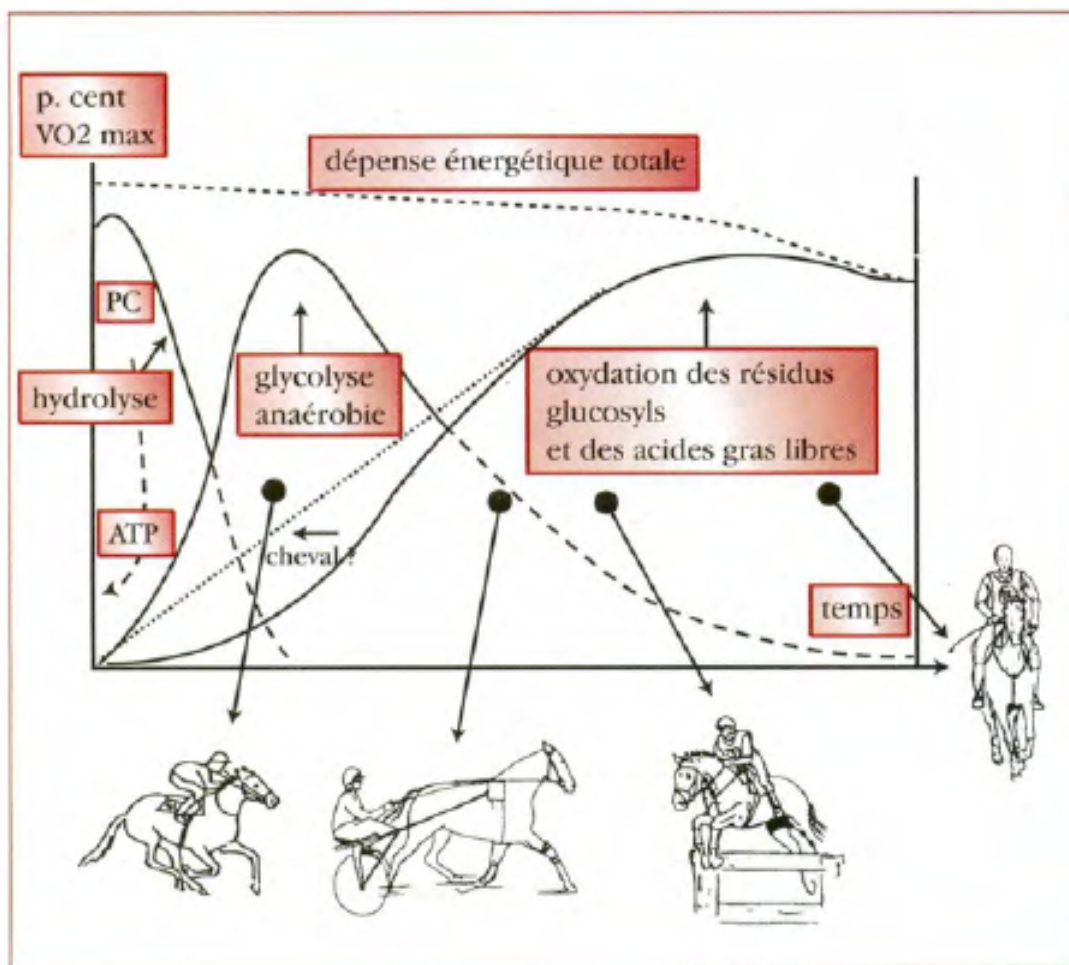


FIGURE 8 – Interventions des différentes voies de synthèse de l'ATP lors de l'exercice musculaire (Art *et al.*, 2000).



1.2 Métabolisme énergétique à l'échelle du muscle squelettique

1.2.1 L'organisation des muscles squelettiques

La contraction musculaire correspond à la conversion de l'énergie chimique en énergie mécanique permettant la mobilisation des rayons osseux autour des articulations et donc la réalisation et le maintien des mouvements.

Composition chimique

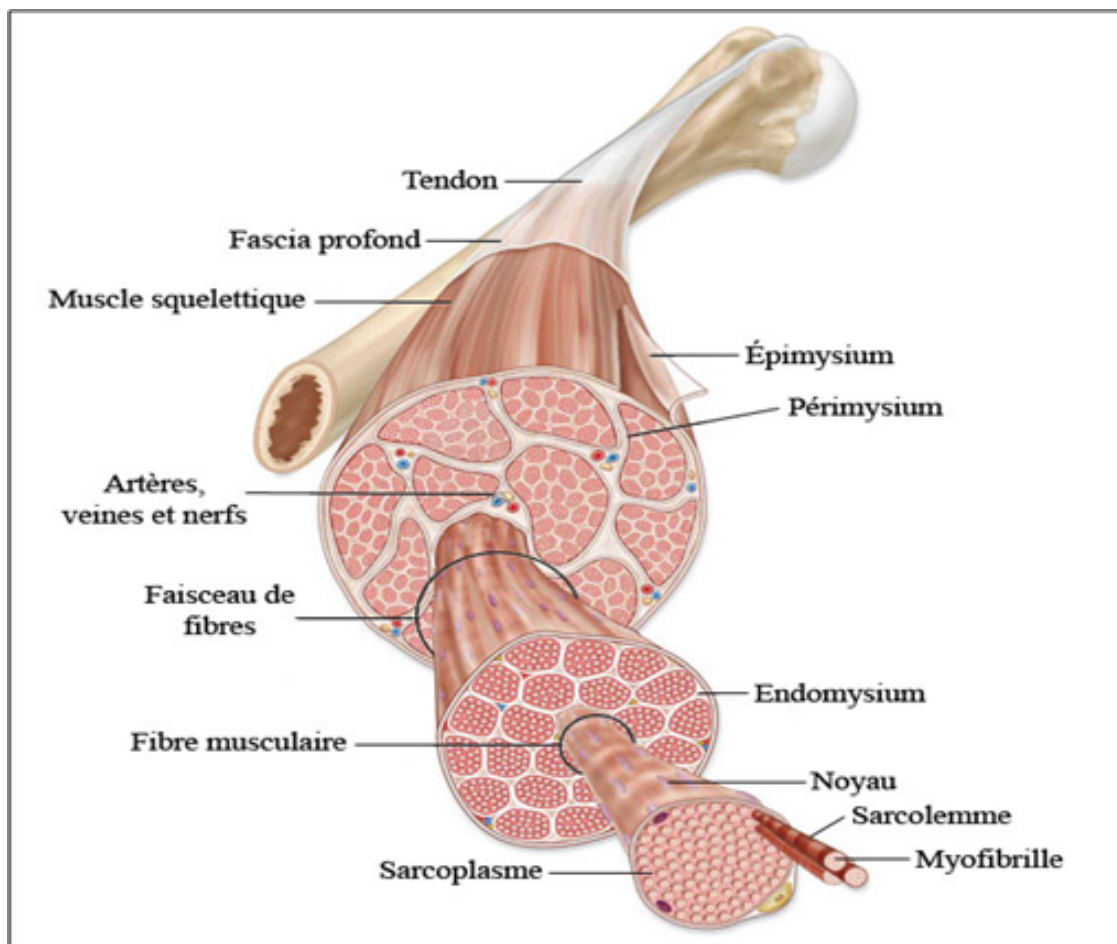
Le muscle squelettique est une structure très riche en eau, jusqu'à 75 % de la masse musculaire. Cela s'explique par les multiples réactions métaboliques intenses s'y déroulant. Le muscle comprend d'autre part 20 % de protéines contractiles (50 à 55 % de myosine, 20 à 25 % d'actine, 10 à 15 % de tropomyosine et actomyosine), et de protéines auxiliaires

comme la myoglobine, non contractile mais possédant un pouvoir de capture du dioxygène très important. Enfin, des hydrates de carbone (0.5 à 1 % du poids du muscle) sous forme de glycogène provenant du glucose sanguin servent de réserve énergétique locale, de même que les lipides, principalement localisés dans le tissu conjonctif (Wolter, 1999).

Ultrastructure

La structure musculaire squelettique se caractérise par l'emboîtement d'unités parallèles de taille de plus en plus réduite (Figure 9). Le muscle est un ensemble de faisceaux de longues fibres disposées dans le sens de sa longueur, entouré d'un fascia appelé *épimysium*. Chaque faisceau, individualisé par le *périmysium*, regroupe jusqu'à 150 fibres. Chaque fibre est une cellule unique entourée d'un tissu conjonctif appelé *endomysium*. Elle est munie de nombreux noyaux et de myofibrilles qui se composent elles-mêmes de myofilaments fins, constitués de deux brins d'actine et d'un brin de protéines régulatrices enroulés (McArdle *et al.*, 2014). Nous ne détaillerons pas ici le cycle moléculaire de contraction d'une fibre musculaire.

FIGURE 9 – Structure d'un muscle squelettique (d'après "Université de Laval").



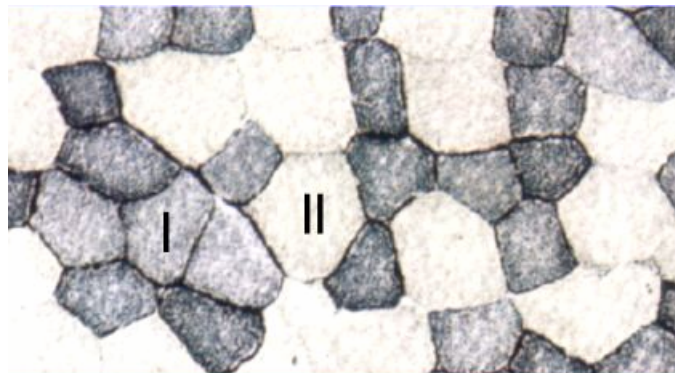
Afin de répondre à la forte activité métabolique aérobie du muscle, chaque faisceau est irrigué par une ou plusieurs artères. Un important réseau de capillaires (environ 4000 par millimètre carré de coupe transversale) traverse l'*endomysium* et irrigue toutes les fibres musculaires. Les veines, chargées de l'évacuation rapide des déchets, abondants lors d'effort prolongé, sont de distribution comparable. Il n'est possible de les distinguer 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 *périmysium*.

Le déclenchement, le contrôle et la coordination du mouvement sont sous contrôle des motoneurones. Après intégration du signal conduit par la moelle épinière depuis l'encéphale jusqu'aux corps cellulaires des motoneurones, l'information est transmise via l'axone moteur jusqu'à la jonction neuromusculaire. En présence d'énergie, les protéines contractiles des myofibrilles peuvent se raccourcir et développer une tension dont résulte, par addition, le mouvement. Selon les propriétés contractiles des myofibrilles, chaque fibre a une physiologie propre (McArdle *et al.*, 2014).

1.2.2 Typologie des fibres musculaires

Si l'ultrastructure et le fonctionnement cellulaire global des fibres sont relativement homogènes au sein du système musculaire squelettique, on distingue plusieurs types de fibres selon leurs propriétés contractiles et métaboliques. Une classification des fibres a pu être établie par Howald et Wassermann en 1988. Le premier à avoir découvert la variété des types musculaires est l'italien Lorenzy en 1678 lorsqu'il a constaté une différence flagrante de couleur parmi les muscles du lapin : il a observé des muscles "rouges" et des muscles "blancs". D'après "Histologie et Génétique, il est aujourd'hui possible de typer les fibres musculaires prélevées par biopsie grâce à une méthode histo-chimique de colorations qui révèle l'activité des enzymes de la phosphorylation oxydative et du cycle de Krebs (Figure 10).

FIGURE 10 – Coloration histo-enzymologique des fibres de type I et II (d'après "Histologie et Génétique").



- **Les fibres de type I** sont caractérisées par une vitesse de contraction lente (3 fois plus faible que les fibres de type II), de faible force, mais avec une grande résistance à la fatigue ce qui les rend particulièrement adaptées aux exercices de longue durée comme l'endurance (Howald, 1988). Ces fibres s'identifient par leur métabolisme aérobie avec combustion complète sans déchet des substrats énergétiques, préférentiellement des lipides par rapport aux glucides, cette épargne permettant de maintenir l'effort plus longtemps. La diffusion de l'oxygène est facilitée par une capillarisation et une teneur en myoglobine importante. Ce pigment rouge-brun est en effet une protéine de capture/stockage efficace de l'oxygène, plus affin encore que l'hémoglobine. Il permet de distinguer macroscopiquement le type de fibres.
- **les fibres de type II_X**, ont des caractéristiques opposées. Leur contraction est rapide, de force élevée, mais leur résistance à la fatigue est faible, ce qui les sélectionne pour les exercices de puissance de courte durée tels que le sprint. En effet, leur métabolisme anaérobie lactique impose une combustion exclusivement glucidique qui aboutit à l'accumulation d'acide lactique, molécule qui renferme encore 9/10 de l'énergie potentielle du glycogène utilisé. Le rendement énergétique est alors médiocre et entraîne de fortes déperditions thermiques (Snow et Valberg, 1994).
- **les fibres de type II_A** sont caractérisées par une contraction rapide, à la force et résistance à la fatigue intermédiaires entre les fibres de type I et II_X. Leur métabolisme est mixte, aérobie et anaérobie, avec un approvisionnement énergétique presque exclusivement glucidique. Grâce à un bon métabolisme aérobie, ceux-ci subissent majoritairement une combustion complète jusqu'au CO₂ sans accumulation dangereuse d'acide lactique. Le rendement énergétique est très bon, 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_X, ce sont les fibres spécialisées de la tenue de la vitesse, particulièrement utiles au sprint long, tel que celui du cheval de course.
- **les fibres de type II_B** sont retrouvées en faible quantité par rapport aux autres et leur fonction est mal comprise : il s'agirait de formes immatures des fibres, capables d'évoluer vers l'un des types précédents, ou de la forme transitionnelle du type II_X au type II_A (McMicken, 1983).

Dans les muscles squelettiques, chez le cheval comme chez l'homme, les fibres de type I ont un diamètre inférieur aux fibres de type II_A. Ce sont les fibres de type II_X qui possèdent le diamètre le plus important. Un faible diamètre implique une faible distance de diffusion pour l'oxygène ainsi que pour les déchets du métabolisme ce qui est compatible avec une

activité aérobie élevée (Essén-Gustavsson et Lindholm, 1985). Des études comparatives menées chez l'homme et chez le cheval ont par ailleurs montré que les fibres possédant les diamètres les plus importants développaient des forces de contraction plus élevées (Henckel, 1983). Les caractéristiques des différentes fibres sont synthétisées par Snow et Valberg en 1994 dans le tableau 3.

TABLEAU 3 – Caractéristiques des différents types de fibres musculaires chez le cheval (Snow et Valberg, 1994).

| Caractéristiques des fibres | Type I | Type II _A | Type II _X |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| Caractéristiques contractiles : - Vitesse de contraction - Fatigabilité - Force de contraction | 100-200 ms Plusieurs heures + | 40-88 ms Plusieurs minutes ++ | 40-88 ms <une minute +++ |
| Activité de la myosine ATPase : - Après incubation à pH=9,4 - Après incubation à pH acide (4,3-4,6) | + +++ | +++ + | +++ ++ |
| Potentiels métaboliques : - Activité des enzymes glycolytiques - Activité des enzymes oxydatives | + +++ | ++ ++ | +++ + |
| Teneur en substrats énergétiques : - Glycogène (anaérobie) - Lipides (aérobie) | ++ +++ | +++ ++ | +++ + |
| Autres caractéristiques : - Vascularisation capillaire - Surface des fibres | +++ + | ++(+) ++ | + +++ |

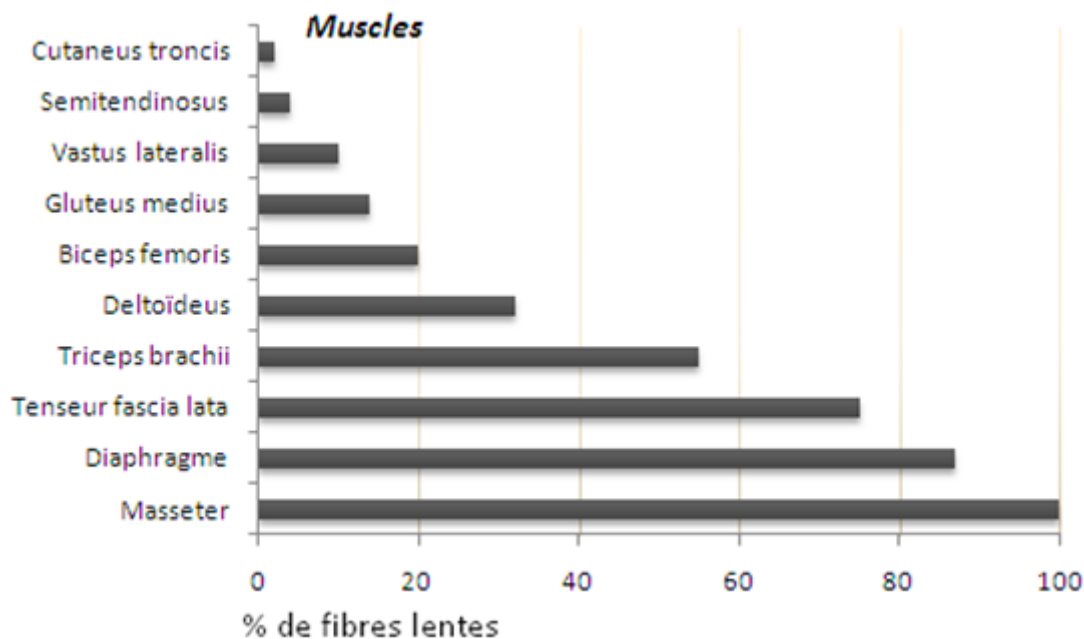
1.2.3 Variations de la composition des fibres musculaires

La proportion des différentes fibres dans un muscle est la résultante de diverses influences : la génétique en fait partie si l'on considère la diversité des races et leur utilisation.

En fonction du type de muscle

La proportion relative de fibres I et II dans un muscle donné dépend de ses caractéristiques fonctionnelles, comme le montrent Demonceau *et al.* (1993), sur des chevaux de course (Figure 11). Un muscle devant travailler longtemps avec une faible force sera d'autant plus riche en fibres de type I. C'est le cas du diaphragme et des muscles masséters. Ces derniers possèdent 100 % de fibres de type I, alors que, inversement, les muscles semi-tendineux, sollicités pour la propulsion (*a fortiori* chez le cheval de course), en présentent moins de 4 %.

FIGURE 11 – Variation de la typologie dans différents muscles de chevaux de course (Demonceau *et al.*, 1993).



De plus, au sein même d'un muscle, le type de fibre n'est pas homogène selon l'emplacement et la profondeur du prélèvement musculaire effectué dans un contexte de biopsie. En effet, la proportion de fibres lentes passe de 13 à 30 % dans le fessier moyen, de la pointe de la hanche à la région de la tête du fémur, et de 5 à 33 % si le prélèvement passe de 6 à 9 cm de profondeur (Demonceau *et al.*, 1993). Outre les particularités squelettiques, le système musculaire signe l'adaptation du cheval à la fonction vers laquelle il a été sélectionné.

En fonction de la race

Barrey *et al.* ont prouvé en 1997 que l'héritabilité du pourcentage de myosine rapide (type II) est de 13 % chez le cheval. La proportion des fibres est donc liée à la génétique et en découlent certaines facultés sportives dans les lignées correspondantes. Les races qui possèdent le plus grand nombre de fibres de type I et II_A par rapport aux fibres de type II_X ont un métabolisme orienté vers la voie aérobie principalement. Ce sont des races performantes pour des disciplines qui nécessitent de l'endurance. Au contraire, les races possédant davantage de fibres de type II et peu de fibres de type I seront performantes pour les exercices de vitesse et de puissance de courte durée.

Dans la figure 12 et le tableau 4, il est intéressant de voir le lien de cause à effet entre la distribution des fibres musculaires qui caractérise chaque race et la voie métabolique prépondérante dans l'effort demandé au cheval, qui correspond, en toute logique, à l'exploitation des capacités physiques naturelles d'une race.

FIGURE 12 – Participation relative des différentes voies métaboliques selon la discipline du cheval (Couroucé, 2004).

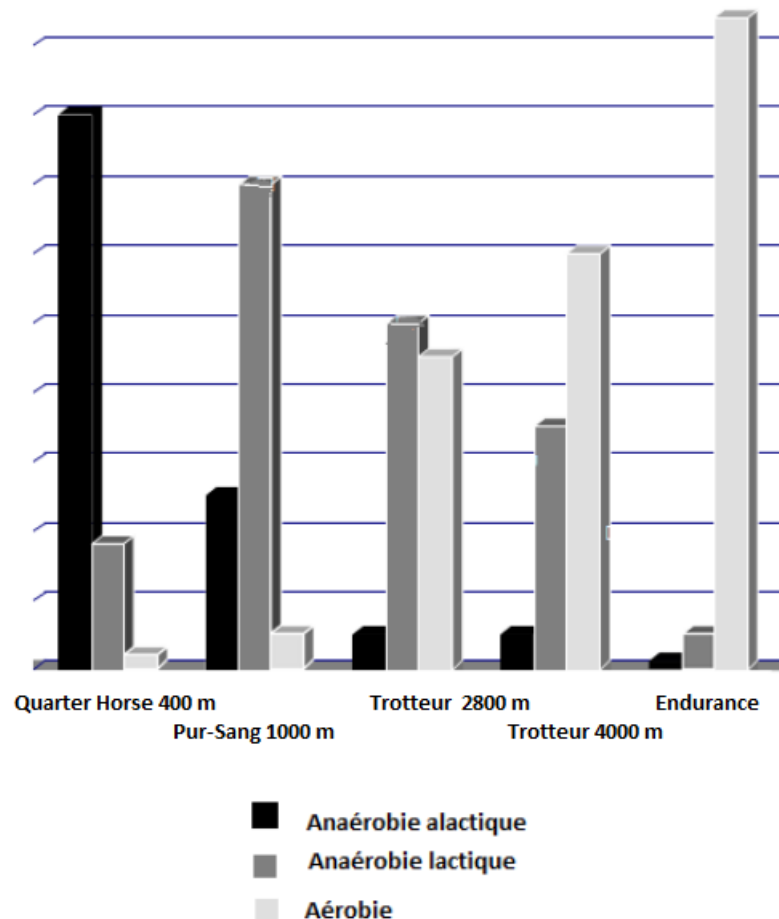


TABLEAU 4 – Type de fibres musculaires en fonction de la race, en pourcentage du total (Lopez-Rivero, 1989).

| RACES FIBRES | Type I | Type II _A | Type II _X | Types II _{A+X} |
|----------------|--------|----------------------|----------------------|-------------------------|
| Quarter Horse | 9 | 51 | 40 | 91 |
| Pur-Sang | 10 | 59 | 27 | 86 |
| Arabe | 14 | 48 | 38 | 86 |
| Trotteur | 21 | 52 | 31 | 84 |

Le Trotteur, le Cheval de chasse et l'Arabe sont donc classés dans la catégorie des endurants, avec plus de fibres lentes que le Pur-Sang anglais et le Quarter Horse, plus dotés pour le sprint. Ce dernier, race américaine ultra rapide sur le quart de mile (d'où son nom), apparaît comme le meilleur sprinter avec le plus grand pourcentage de fibres II (II_A + II_X) et le plus haut pourcentage de fibres II_X.

En fonction de l'âge

La proportion définitive des fibres n'est atteinte qu'à l'âge adulte. En effet, d'après les études de Art *et al.* sur les muscles glutéaux en 2000, les poulains de 12 mois sont dotés de plus de 66 % de fibres de type I alors que dès 24 mois, les fibres de type II et notamment II_X sont majoritaires.

Le faisceau musculaire se compose de fibres musculaires constituées de myofibrilles, assemblages de myofilaments complexes. Leurs spécificités contractiles et métaboliques orientent leur fonctionnement : les fibres I sont lentes et endurantes, optimales pour un effort d'endurance de qualité, les fibres II_X rapides et explosives, orientées pour le sprint, et les fibres II_A, intermédiaires. La proportion des différents types varie en fonction du type de muscle, de l'âge, et de la race du cheval et les prédispose à un certain type d'exercice. La répartition de ces fibres peut être modifiée par l'entraînement comme nous le verrons plus tard.

2. ADAPTATIONS DES GRANDES FONCTIONS À L'EFFORT ET EFFETS DE L'ENTRAÎNEMENT

L'activité musculaire s'accompagne de manifestations circulatoires, respiratoires et hématologiques. Ces modifications ont pour objectif d'assurer l'approvisionnement des muscles en oxygène et en substrats énergétiques tout en permettant une bonne évacuation du CO₂ et de la chaleur. La masse musculaire représentant plus de la moitié de la masse globale de l'organisme, les besoins en oxygène au cours de l'effort sont considérables, jusqu'à 200ml d'O₂ /kg/min (Auvinet *et al.*, 1991). La consommation en oxygène répond à l'équation suivante :

$$VO_2 = Q \times [O_2] \text{ (différence artérioveineuse).}$$

Avec Q : débit cardiaque exprimé en ml/min/kg, $Q = FC \times VS$,
 FC : la fréquence cardiaque en battements par minute (bpm) ;
 VS : le volume d'éjection systolique en ml/kg.

Cette équation indique que différents systèmes sont engagés pour répondre à la demande accrue de l'organisme en oxygène. Il s'agit des adaptations à l'effort.

2.1 Adaptations cardiovasculaires

2.1.1 Fréquence et débit cardiaques

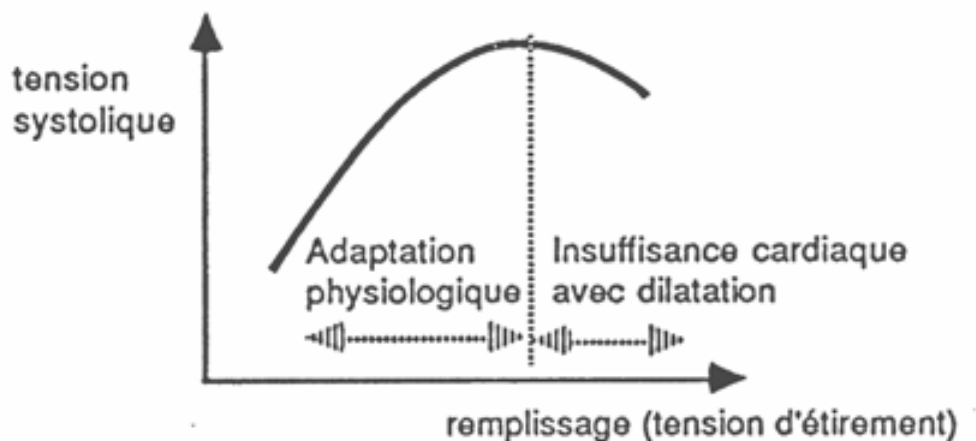
L'exercice entraîne une augmentation de la force et de la vitesse de contraction du muscle cardiaque. En effet, **la fréquence cardiaque** (FC) augmente rapidement et linéairement avec l'intensité de l'effort jusqu'à atteindre un plafond que l'on appelle FC maximale (Rose et Evans, 1987). De 30 à 35 bpm en moyenne au repos chez le cheval, la FC peut augmenter jusqu'à atteindre des valeurs supérieures à 240 bpm (soit 8 fois les valeurs de repos). Par rapport à l'homme qui ne peut que tripler ou quadrupler sa fréquence cardiaque de repos à l'effort, le cheval présente donc une large réserve de fréquence cardiaque.

Le volume d'éjection systolique (VS) augmente également rapidement avec l'effort. De 900 ml par battement au repos, il peut atteindre 1270 ml à l'effort. Cette augmentation du VS est favorisée par l'amélioration du retour veineux. Pour une intensité de 100 % de la VO_2 max, le flux sanguin musculaire est estimé à 78 % du débit cardiaque et ce flux sanguin est préférentiellement orienté vers les muscles impliqués dans l'effort. Les deux paramètres, FC et VS, déterminent le **débit cardiaque Q**. Leur augmentation concomitante permet d'atteindre un débit de 240 l/min contre 35 l/min au repos. Cette optimisation du débit cardiaque permet de rendre maximal le transport de l'oxygène et du dioxyde de carbone (Rose et Evans, 1987).

Deux types d'adaptations cardiaques

Le cœur est capable de s'adapter à l'effort **à court terme**. Selon Couroucé (1993), ceci consiste en une augmentation immédiate de la force et de la vitesse de contraction, selon la loi de Franck-Starling illustrée par la figure 13 Cette adaptation permet au cœur de faire face à une surcharge volémique brutale et passagère mais a pour conséquence une augmentation importante du travail cardiaque.

FIGURE 13 – Mécanisme de Frank-Starling, liant le volume d'éjection systolique (tension systolique) au volume de remplissage cardiaque (Couroucé, 1993).



L'adaptation **à long terme** apparaît chez un individu chez lequel le cœur se retrouve régulièrement et fréquemment exposé à ces surcharges passagères. Des études échocardiographiques ont mis en évidence une bonne corrélation entre la masse du ventricule gauche et les capacités aérobies du cheval, donc indirectement avec ses performances (Young *et al.*, 2002). Les modifications morphologiques sont marquées par un épaississement des parois lors d'un entraînement en puissance (+11 à 13 %) et une augmentation globale de la masse du ventricule gauche lors d'un entraînement en endurance (+33 à 40 %). En effet,

l'entraînement en puissance produit une augmentation de la postcharge, qui se traduit par l'ajout de myofibrilles parallèlement à la paroi. L'entraînement d'endurance, lui, en augmentant la précharge et le débit cardiaque, aboutit à l'addition de myofibrilles en série, responsable de l'augmentation en volume du ventricule. Cela a pour conséquence d'élever la pression artérielle pour une même tension développée. Une plus grande quantité de sang est alors envoyée à chaque battement et, de ce fait, le volume d'oxygène est lui aussi plus important. Ainsi, le cheval compense le manque d'oxygène dû au fait qu'il ne puisse pas augmenter sa capacité pulmonaire (cf infra), malgré l'entraînement.

En 2000, Rose *et al.* ont montré que pour une vitesse donnée, la FC diminue avec l'entraînement. Après l'effort, la fréquence cardiaque redescend rapidement au cours de la première minute d'arrêt, puis graduellement par la suite. Enfin, on observe une diminution plus rapide de la FC après l'effort chez un cheval entraîné que chez un cheval qui ne l'est pas. Il n'en reste pas moins que la FC maximale n'est pas modifiée par l'entraînement.

Il semblerait que comme chez l'homme, la FC maximale (et la $VO_2\text{max}$) diminue avec l'âge, du fait de la diminution du nombre de cellules pacemaker dans le nœud sino-atrial (Dauvillier et Van Erck, 2013). L'insuffisance mitrale du cheval âgé, c'est-à-dire à partir de 15 ans, est fréquente (régurgitations du ventricule gauche vers l'oreillette gauche), de même que l'hypertension pulmonaire secondaire aggravée par des phénomènes inflammatoires chroniques ou des cicatrices d'hémorragie pulmonaire à l'effort (fibrose du parenchyme). Nous reviendrons plus en détail dans le chapitre 3 sur le paramètre clé qu'est la FC, véritable "compte-tours" du cheval de sport.

2.1.2 La pression sanguine

La pression sanguine est le produit du débit cardiaque et de la somme des résistances périphériques. Celles-ci dépendent de la viscosité du sang mais aussi du diamètre des vaisseaux. Ces diamètres varient, permettant une redistribution du débit sanguin des territoires inactifs (sièges d'une vasoconstriction) vers les territoires actifs (sièges d'une vasodilatation), de même qu'une accélération du retour veineux. Les pressions diastolique et systolique sont de l'ordre, respectivement, de 67.7 mmHg et 111.8 mmHg au repos (Rose, 2000).

La pression moyenne augmente de façon linéaire avec l'effort mais les facteurs de régulation ne sont pas encore clairement élucidés. Avec le recrutement important des capillaires musculaires et pulmonaires dès le début de l'effort, les résistances périphériques diminuent. Cela permet de compenser l'augmentation du débit cardiaque, afin de maintenir la pression moyenne dans des valeurs raisonnables. On constate tout de même une hypertension artérielle pulmonaire à l'exercice, pouvant atteindre 100 mmHg pour une valeur moyenne au repos de 26 mmHg. D'après Couroucé (1993), mécanisme favoriserait le remplissage

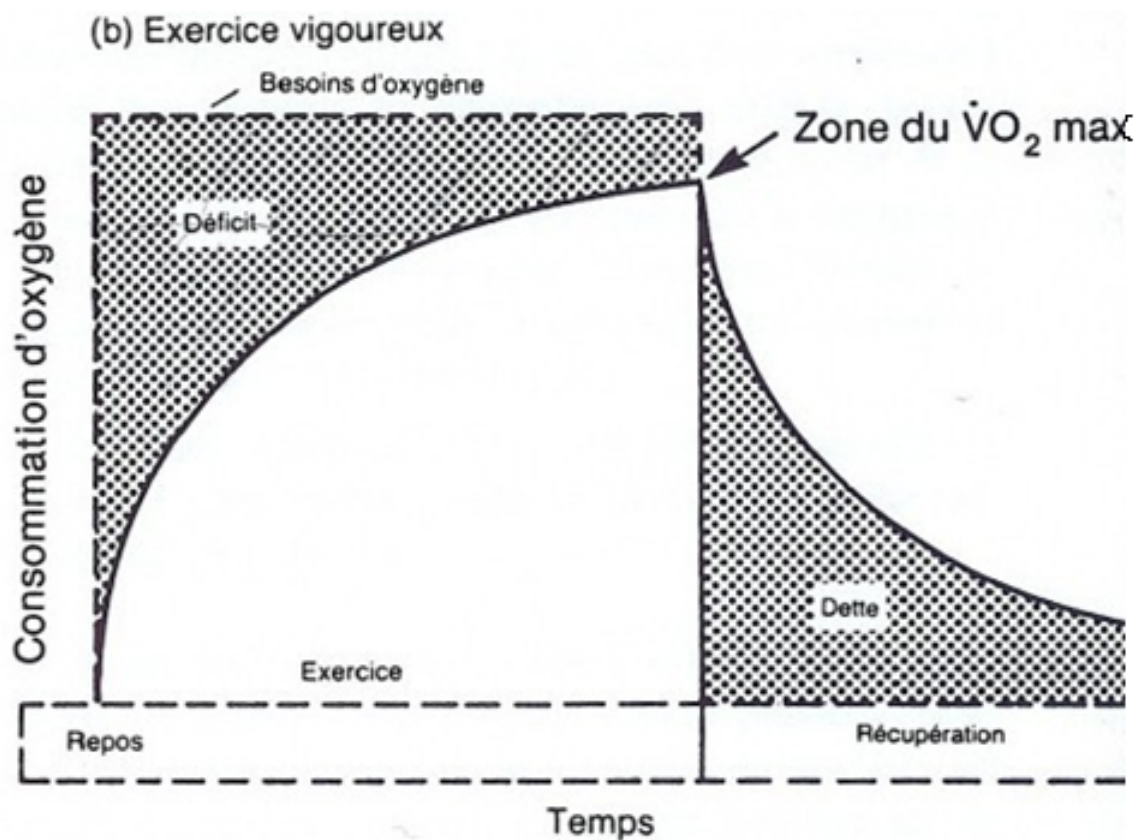
diastolique du cœur gauche lorsque la fréquence cardiaque atteint des valeurs maximales. Il n'en reste pas moins que cela explique aussi la fréquence des hémorragies pulmonaires qui apparaissent au cours des exercices intenses.

2.1.3 La consommation d'oxygène

La détermination de la $\dot{V}O_2 \text{ max}$ est utilisée de longue date en médecine humaine pour l'appréciation de la capacité aérobie de l'athlète (Figure 14). Tout comme la FC, la consommation en oxygène augmente avec la vitesse, jusqu'à la $\dot{V}O_2 \text{ max}$ qui correspond au seuil aérobie, à partir duquel de nouvelles voies énergétiques sont recrutées. Elle est d'environ 120 ml d' O_2 /kg/min chez le cheval (contre 80 chez les meilleurs athlètes humains).

FIGURE 14 – Consommation d'oxygène pendant un exercice intense (Wilmore et Costil, 1998).

$\dot{V}O_2 \text{ max}$: consommation maximale d'oxygène (en ml/min/kg).



La $\dot{V}O_2 \text{ max}$ varie en fonction du niveau d'entraînement du cheval, comme le montre le tableau 5 (Evans et Rose, 1987). Au cours des 4 à 6 premières semaines d'entraînement, la $\dot{V}O_2 \text{ max}$ peut augmenter de 30 %. Toutefois, ce gain est perdu très rapidement à l'arrêt de l'entraînement, dans les 6 semaines qui suivent l'arrêt (Rose, 2000).

TABLEAU 5 – Évolution de la VO_2 max en fonction de l'entraînement (Evans et Rose,1987).

VO_2 max : consommation maximale d'oxygène.

| Niveau d'entraînement | VO_2 max (ml d' O_2 /kg/min) |
|------------------------------------------------|----------------------------------|
| Trotteur non entraîné | 135,4 |
| Pur-Sang non entraîné | 129,7 |
| Pur-Sang en milieu de programme d'entraînement | 160,0 |
| Pur-Sang en fin de période d'entraînement | 151,2 |

On notera également que le rapport VO_2 max/ VO_2 repos est très élevé (de l'ordre de 36 chez le cheval contre 15 à 20 chez l'homme). Le cheval donc une capacité impressionnante à augmenter le transport d'oxygène des poumons vers les muscles. Mais si le cheval ne semble pas limité par son système cardiovasculaire, il n'en va pas tout à fait de même pour le système respiratoire.

2.2 Adaptations respiratoires

2.2.1 Les deux stratégies ventilatoires

L'organisme fait circuler plus vite une grande quantité de sang lors d'un effort. Mais ceci n'a d'intérêt que si le sang est correctement oxygéné par l'hématose. Cela implique une adaptation de l'appareil respiratoire pour une optimisation des échanges gazeux. Les paramètres mis en jeu sont :

- la ventilation (transfert de l'air vers les alvéoles) ;
- la perfusion (la circulation sanguine pulmonaire) ;

- la diffusion des gaz à travers la barrière pulmonaire ;
- la mécanique ventilatoire (mobilisation des poumons) ;
- le contrôle de la respiration.

Le volume d'air ventilé augmente de façon linéaire avec la vitesse. Lors d'efforts intenses, le volume d'air ventilé peut être multiplié par 30 jusqu'à atteindre les 1300 L/min. Or le volume ventilé correspond au produit du volume courant et de la fréquence respiratoire, ce qui suppose deux possibilités de stratégies ventilatoires (Hörnigke, Meixner et Polmann, 1983).

Au galop, l'augmentation de la ventilation est principalement liée à une élévation de la **fréquence respiratoire** : elle peut varier de 8-12 mouvements par minute au repos à 148 mouvements par minute pour un volume courant de 12L à l'effort. Cette adaptation est spécifique des mammifères, qui présentent pendant le galop un couplage de la fréquence respiratoire et de la fréquence des foulées (Hoyt, 1981). En effet, le balancier cervical et l'effet piston des viscères abdominaux sur le diaphragme assistent le travail des muscles respiratoires. L'inspiration intervient lors de la protraction des membres antérieurs et de l'extension lombosacrée. Les viscères sont déplacés caudalement. En revanche, lors de la protraction des postérieurs, les viscères sont comprimés crânialement contre le diaphragme par la contraction des muscles abdominaux et l'augmentation de la pression intra-abdominale, ce qui favorise l'expiration (Young et Alexander, 1992).

Au pas et au trot, c'est au contraire l'augmentation du **volume courant** qui assure une meilleure ventilation à l'effort, indépendamment de la fréquence des foulées. On relève un volume courant de 18 L pour une fréquence respiratoire de 87 mpm. Ces allures sont même compatibles avec une ventilation incomplète de l'espace alvéolaire par ce volume courant, du fait de la présence d'un espace mort anatomique (voies respiratoires hautes) et d'un espace mort alvéolaire. Ce dernier correspond aux alvéoles ventilées sans être perfusées, donc inutiles à la fonction respiratoire mais cet espace fluctue grâce au recrutement de la vascularisation capillaire : le rapport volume mort / volume courant passe de 50 % au repos à 20 % à l'effort (Art *et al.*, 1990).

2.2.2 Le facteur limitant de la physiologie de l'effort

En ce qui concerne les gaz sanguins, il a été démontré que des chevaux sains réalisant des efforts de forte intensité, estimée à 65 % de VO_2 max présentaient systématiquement une hypoxémie importante associée à une hypercapnie. Cela traduit une certaine inaptitude du système respiratoire à répondre de façon adéquate à une forte demande en oxygène de l'organisme. En effet, contrairement aux autres fonctions impliquées dans l'exercice (cardiaque, musculaire), la ventilation pulmonaire n'est quasiment pas modifiée par l'entraînement du fait de l'incapacité du système respiratoire à augmenter sa surface

d'échange. Ainsi, la fonction respiratoire constitue le **facteur limitant la physiologie de l'effort** et un motif de contre-performance fréquent, en lien avec la forte tendance du cheval à être sujet aux affections respiratoires des voies hautes ou basses. (Art *et al.*, 1990).

Cependant, Art *et al.* ont envisagé en 2000 une autre approche, à partir de la considération de l'incapacité du cheval à court-circuiter la respiration nasale par une respiration buccale, de ses voies aériennes longues et ponctuées de zones à forte résistance au passage de l'air et de la rigidité thoracique. Ces caractéristiques imposent des forces mécaniques respiratoires très coûteuses en énergie au point que lorsque le volume ventilé est multiplié par 8, l'effort du travail ventilatoire est multiplié par 40. La consommation d'O₂ des muscles respiratoires eux-mêmes augmente simultanément de façon exponentielle si bien qu'à partir d'un « seuil critique de ventilation », toute augmentation du volume d'O₂ transporté ne bénéficie qu'aux muscles respiratoires. L'hypoxémie et l'hypercapnie seraient alors un compromis physiologique qui permettrait à l'organisme de minimiser la dépense énergétique consacrée à la respiration et non pas un signe de déficience du système respiratoire.

L'entraînement exacerbe le phénomène d'hypoxie/hypercapnie dans le sens où plus le cheval est entraîné plus il augmente ses capacités aérobies donc plus il prélève de l'oxygène pour fonctionner. On retiendra que chez un cheval non entraîné, les facteurs limitants de la performance sont les muscles, le cœur puis les poumons, alors que chez un sujet entraîné, les poumons sont les plus limitants, suivis du cœur et des muscles (Art *et al.*, 2000).

2.3 Adaptations hématologiques

Une fois l'oxygène apporté au sang par le système respiratoire, c'est l'hémoglobine qui transporte et transfère l'O₂ à la myoglobine des muscles. Il s'agit d'un autre facteur intervenant dans l'augmentation de la VO₂. L'hypoxie inhérente à tout effort et les causes de stress classiques stimulent le relargage d'érythropoïétine, à l'origine d'une augmentation de la production d'hémoglobine et donc du nombre de globules rouges. À cela s'ajoute **la contraction splénique** : ce phénomène permet de doubler les capacités de transport de l'oxygène, par la mobilisation du plasma et des hématies stockées dans la rate. L'hématocrite, d'environ 35 % au repos, peut alors atteindre 70 % lors d'un effort ou toute autre stimulation adrénergique (Evans, 1988). Ce phénomène d'« auto-transfusion » est linéairement associée à la vitesse du travail (Tableau 6).

TABLEAU 6 – Illustration des variations de l'hématocrite chez le cheval en fonction de l'exercice (Rose *et al.*, 1987).

| Type d'effort | Repos | Endurance | Trot | Cross | Galop |
|------------------|-------|-----------|--------|--------|--------|
| Hématocrite (%) | 42 | 45 | 57 | 60 | 63 |
| Variation | / | + 7 % | + 35 % | + 49 % | + 50 % |

L'entraînement induit une augmentation du nombre de globules rouges, de l'hémoglobine et de l'hématocrite. Le relargage des nouveaux globules rouges dans la circulation ne permet pas seulement de compenser en partie l'hypoventilation à l'effort et de soutenir le métabolisme aérobie. Ce supplément d'hémoglobine jouerait un rôle important de tampon acido-basique dans le contexte d'acidose métabolique induit par l'effort. Néanmoins, la splénocontraction provoque inévitablement une hausse de la viscosité sanguine et donc de la résistance périphérique et de la tension artérielle. En effet, chez des chevaux splénectomisés, on notera que leur VO_2 max est diminuée de 20 % à 30 %, mais leur hypertension à l'effort est nettement moindre (Rose *et al.*, 1987).

Les pertes liquidiennes étant très importantes du fait de l'intensité des réactions métaboliques et des pertes incompressibles (respiration, transpiration), le cheval doit trouver les ressources en lui-même, ce qui passe par une augmentation de son volume plasmatique global. Cela permet une sudation appropriée à l'homéostasie thermique (McKeever *et al.*, 1987).

2.4 Thermorégulation au cours de l'effort

2.4.1 Gains thermiques

Par définition, les homéothermes sont des organismes dont le fonctionnement impose que leur température interne soit maintenue dans un intervalle bien précis, compris entre 37 et 40°C dans le cas du cheval. Au cours de tout type d'effort, ces organismes produisent et, éventuellement, reçoivent de la chaleur de manière irrépressible. En effet, le travail physique provoque une augmentation du métabolisme basal, producteur d'une quantité non négligeable de chaleur.

On considère qu'environ 80 % de l'énergie produite l'est sous forme thermique (Hodgson *et al.*, 1993). Elle est proportionnelle au produit de la VO_2 (l/min) et de la durée (min). À cela peuvent s'ajouter des facteurs environnementaux tels que le rayonnement solaire,

la température ambiante, l'humidité ou même les caractéristiques éoliennes du milieu. Le tableau 7 présente une estimation de l'augmentation de la chaleur corporelle au cours de différents types d'effort (Franklin, 2016).

TABLEAU 7 – Chaleur métabolique et augmentation théorique de la température centrale en fonction du type d'effort (Franklin, 2016).

| Variable | Endurance (cheval de 400 kg) | Concours Complet (cheval de 500 kg) | Course de galop (cheval de 450 kg) |
|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|
| Vitesse moyenne en m/s | 4 | 4,5 | 16 |
| VO ₂ en l/min | 25 | 32 | 80 |
| Production de chaleur en kJ/min | 400 | 500 | 1250 |
| Augmentation théorique de la température corporelle en °C/min | 0,25 | 0,25-0,30 | 0,80 |

Cette chaleur peut être bénéfique à l'effort, jusqu'à 40°C, en améliorant le transfert de l'O₂ de l'hémoglobine vers la myoglobine, ce qui souligne l'intérêt des échauffements. Cependant, si l'hyperthermie à l'effort perdure trop longtemps, elle peut provoquer des lésions du système nerveux central, et avoir des effets néfastes sur le métabolisme musculaire et les performances.

Il se trouve qu'un cheval âgé atteint 2 fois plus vite une température centrale de 40°C qu'un jeune cheval, lors d'un même exercice. Cela est dû à une moindre thermorégulation corporelle, du fait de la diminution des capacités cardiovasculaires (perfusion des muscles au détriment de la peau) et du volume plasmatique, de -15 % entre 7 ans et 26 ans (Dauvillier et Van Erck, 2013). Par ailleurs, la température sanguine centrale de 42,5°C aboutit expérimentalement à l'exténuation chez le cheval (Hodgson *et al*, 1994).

La production de chaleur issue de contraction musculaire, ne serait-ce qu'au début de l'effort, dépassant largement la chaleur dissipée, un système efficace d'évacuation de celle-ci est indispensable. Quatre mécanismes de base interviennent dans la dissipation de la chaleur à l'effort, par transmission de la chaleur d'un corps à un autre en suivant un gradient thermique : la radiation, la convection, la conduction et l'évaporation.

2.4.2 Les voies de dissipation de la chaleur

La radiation

La radiation correspond à des ondes électromagnétiques émises à la surface du corps. Ce mécanisme intervient peu dans la dissipation de la chaleur chez le cheval. 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 (Franklin, 2016).

La convection

La convection se caractérise par le transfert de chaleur entre deux milieux de températures différentes. D'après Franklin (2016), le cheval sportif, ce phénomène est important lorsque l'environnement est froid, par échange entre l'air emprisonné dans le pelage et l'air ambiant et surtout au sein des voies respiratoires, sous l'influence directe de la ventilation pulmonaire.

La conduction

La conduction correspond au transfert direct de chaleur entre deux surfaces en contact, avec perte ou gain de chaleur en fonction du différentiel de températures entre les deux corps. Le flux sanguin est le moyen le plus efficace de conduction indirecte de la chaleur du muscle vers la peau et l'appareil respiratoire. On observe une modification du flux sanguin vers la périphérie sous le contrôle du système nerveux sympathique. 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 de l'épaisseur du pelage). Dans le cas du cheval sportif, ce mécanisme est quasiment négligeable du fait de la faible conductivité thermique de l'air (Franklin, 2016).

L'évaporation

L'évaporation de la sueur cutanée est le plus important des quatre mécanismes. Deux phénomènes sont possibles : la sudation et l'expiration. Ils dépendent du gradient de pressions de vapeur d'eau entre la surface d'échange (peau ou appareil respiratoire) et l'environnement, ainsi que du mouvement d'air existant à la surface du corps. Quand la production de sueur est supérieure à la vaporisation, la sueur ruisselle à la surface de la peau. La dissipation d'un litre d'eau permet d'évacuer jusqu'à 2,4 mJ, soit l'équivalent de deux minutes de sprint environ ou de six minutes d'exercice d'endurance. 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 (Marlin *et al.*, 1995). Par contre, une

forte humidité ambiante réduit le différentiel de pression, ce qui minimise l'évaporation. Cela aboutit à l'accumulation de sueur à la surface de la peau.

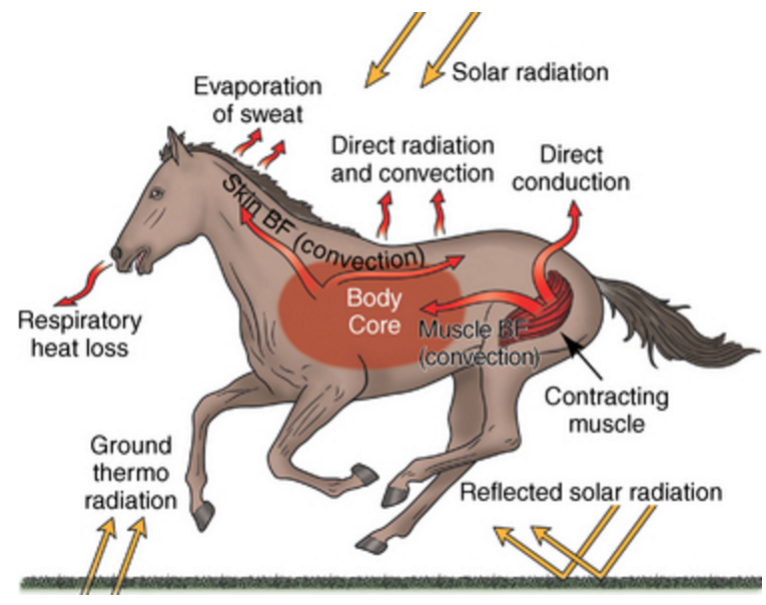
Les quantités de sueur perdues à l'effort sont estimées à 10 à 15 litres par heure en moyenne, ce qui permet d'éliminer environ 60 % de l'énergie produite au cours de l'exercice. Cela engendre une perte non négligeable d'électrolytes (sodium, chlore, potassium) et de liquide, comme l'a montré Carlson en 1975 (Tableau 8), car la sueur du cheval a la particularité d'être hypertonique. On observe également, bien que dans une moindre mesure, une évacuation au sein du tractus respiratoire par saturation progressive de l'air ambiant inspiré en vapeur d'eau. La perte de chaleur par ce biais est estimée à 15 et 25 % de la perte totale de chaleur corporelle, et permet selon la température ambiante et le rythme ventilatoire, de pallier les pertes de sueur parfois insuffisantes.

TABLEAU 8 – Pertes électrolytiques dans la sueur hypertonique des chevaux (Carlson, 1975).

| Electrolytes | Concentrations dans la sueur des chevaux (g/L) |
|--------------|---------------------------------------------------|
| Sodium | 3,5 |
| Chlore | 6,0 |
| Potassium | 1,2 |
| Calcium | 0,1 |

La figure 15 récapitule les phénomènes de transfert de chaleur autour du cheval à l'exercice.

FIGURE 15 – Mécanismes de transferts de chaleur pendant l'exercice (Hodgson, 2013).



2.4.3 Régulation

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 comme nous venons de le voir soumis à un déséquilibre permanent entre gains et pertes 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 d'O₂/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. Ces différents mécanismes dépendent directement 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 moelle épinière, émis selon la hausse de température. Il induit alors une activation adéquate des effecteurs primaires que sont le système circulatoire et les glandes sudoripares.

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. En revanche, dans le cas d'une température extérieure basse, ce fonctionnement est minoré par des vasoconstrictions locales. Ces mécanismes sont régis par le système nerveux sympathique, agissant par ouverture ou fermeture des différentes anastomoses jalonnant les vaisseaux.

2.4.4 Effet de l'entraînement sur la sudation

L'entraînement permet de déclencher précocement la transpiration ce qui fait augmenter plus progressivement la température corporelle, retardant ainsi l'hyperthermie critique. Cette adaptation permet alors de prolonger la durée de la performance. Dans le cas du sprinteur, la production de chaleur est très fugace, ce qui en limite les conséquences. Au regard de la durée d'effort, la perception des éléments climatiques externes, revêt une importance très secondaire. Au contraire, dans le cadre d'un raid d'endurance équestre, l'hyperthermie est atteinte moins rapidement, mais elle est problématique par sa durée. Il semble logique de prévoir une période d'acclimatation à la chaleur et à l'humidité lors d'un changement d'environnement afin que les systèmes de thermorégulation s'adaptent puisqu'ils sont conditionnés par le milieu extérieur (Hörnicker, Meixner et Polmann, 1983).

2.5 Adaptations musculaires

2.5.1 Le type de fibres musculaires

Howald et Wassermann (1988) ont montré que, chez l'homme, les fibres rapides et lentes sont en proportions équivalentes chez un sujet sédentaire alors que l'on observe un pourcentage prédominant de fibres I (lentes) chez les sportifs de haut niveau spécialisés dans les efforts de longue durée. Pour les sprinters, ce sont les fibres II (rapides) qui prédominent. Il y aurait donc une variabilité induite par la pratique du sport en lui-même, mais également par la discipline exercée. Ces remarques sont applicables au cheval et en particulier au trotteur.

Dans le tableau 9, on observe qu'au terme d'une période d'entraînement, la distribution relative des fibres est modifiée dans le sens d'une augmentation des fibres de type I et II_A et d'une diminution des fibres II_X.

TABLEAU 9 – Influence de l'entraînement sur le pourcentage de distribution des différents types de fibres chez cinq trotteurs de 2 ans (Henckel, 1983).

| Moyenne en % (écart-type) | Non entraînés | Après 2 mois d'entraînement | Après 4 mois d'entraînement | Après 6 mois d'entraînement |
|------------------------------|---------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| I | 18,3 (6,1) | 17,1 (7,3) | 21,1 (3,0) | 25,4 (3,8) |
| II _A | 35,6 (10,0) | 39,0 (5,3) | 46,1 (5,5) | 44,8 (6,1) |
| II _X . | 46,2 (9,1) | 44,0 (11,4) | 32,9 (4,9) | 29,9 (3,8) |

En effet, par la production régulière d'un travail musculaire intense, on observe une augmentation de la taille des fibres sans augmentation massive de la taille globale du muscle. Ceci entraîne une compression accrue des capillaires. L'apport de dioxygène nécessaire au travail aérobique d'endurance devenant alors insuffisant, cela stimule progressivement la mise en place de ramifications capillaires locales. On observe de même une hausse des enzymes oxydatives et donc à plus long terme des fibres "rouges" (type I et II_A) au sein de la population musculaire globale. On veillera tout de même à ne pas pratiquer un excès d'entraînement de fond, car un excès de fibres de type I conduirait à des chevaux peu fatigables mais trop lents (Rivero *et al.*, 1989).

2.5.2 Le volume des fibres musculaires

L'entraînement permet une augmentation de la masse musculaire par épaissement fibrillaire sans toutefois que le nombre de fibres n'augmente (Thiriez, 2002). On distingue deux situations :

- les exercices de force et de vitesse (à une fréquence cardiaque supérieure ou égale à 85 % de la fréquence cardiaque maximale) induisent une augmentation des capacités glycolytiques, un développement du système anaérobie alactique et une hypertrophie des fibres musculaires ;
- un effort de type endurance (de 7 à 80 % de la fréquence cardiaque maximale) va, lui, plutôt permettre d'accroître le potentiel oxydatif de toutes les fibres par augmentation du stockage de la myoglobine, de la concentration en enzymes oxydatives, du cycle de Krebs, de la chaîne respiratoire et par accroissement du volume mitochondrial (Snow et Valberg, 1994).

On peut donc conclure que les exercices d'endurance permettent d'adapter le muscle à un travail aérobique peu intense mais qui peut s'étendre dans la durée, par la transformation des fibres rapides en fibres lentes. Quant aux exercices de puissance, ils n'induisent pas de transformation des fibres lentes en fibres rapides mais développent les qualités glycolytiques du muscle. Les qualités d'un sprinter seront ainsi majoritairement inscrites dans son patrimoine génétique alors les qualités d'un coureur de fond peuvent être modifiées et acquises par l'entraînement. Il est donc fondamental de savoir quel type d'effort le cheval doit pratiquer en compétition pour diriger son entraînement.

Après une période d'entraînement, on observe :

- Une hypertrophie excentrique du ventricule gauche ;
- Une augmentation du volume d'éjection systolique ;
- Une augmentation du nombre de globules rouges, de l'hématocrite, de la concentration en hémoglobine et du volume plasmatique au repos ;
- L'accumulation retardée de lactates sanguins et une meilleure tolérance aux valeurs élevées de lactatémie par amélioration du pouvoir tampon ;
- Une diminution des variations du ionogramme par un déclenchement précoce et progressif de la sudation.

Compte tenu de toutes ces caractéristiques exceptionnelles d'adaptation des grandes fonctions à l'effort, il est unanimement reconnu que le cheval a des capacités d'athlète hors pair. Le système cardiovasculaire, loin de constituer une limite à la performance du cheval sain, contrairement à l'homme, est la clé de l'immense capacité aérobie du cheval. Le facteur limitant du cheval à l'entraînement est bel et bien le système respiratoire. À partir de ces constats qui ne cessent d'être de plus en plus pointus, de nouvelles techniques d'entraînement sont mises au point, de même qu'une nouvelle prise en charge médicale du cheval sportif.

3. LES PARAMÈTRES D'APTITUDE SPORTIVE UTILISÉS LORS DU SUIVI DES CHEVAUX À L'ENTRAÎNEMENT

Jusqu'aux années 1970 à 1980, les programmes d'entraînement des chevaux de sport, notamment dans le monde des courses, étaient basés sur le talent de l'entraîneur qui associait une grande connaissance générale des chevaux, un apprentissage auprès d'un entraîneur renommé et la chance de se voir confier des chevaux de qualité. Depuis, des recherches concernant la biochimie et la physiologie du cheval de sport ont permis d'apporter un nouvel éclairage sur la conduite des entraînements. L'exercice régulier et programmé engendre chez le cheval de profondes modifications physiologiques et métaboliques directement associées à l'intensité de l'effort. Ces modifications représentent un outil précieux à décrypter pour le suivi médicosportif du cheval.

3.1 Vers une nouvelle gestion des chevaux de sport : les tests standardisés

3.1.1 Appréciation de l'état de santé du cheval

Pour tester les performances d'un sportif à un instant t , dans le cadre d'un suivi médicosportif, il faut avant tout s'assurer que le cheval est sain car de multiples facteurs autres que l'effort peuvent affecter les paramètres pris en compte. Par exemple, la fréquence cardiaque peut être augmentée par la déshydratation, une boiterie légère, une maladie respiratoire, cardiovasculaire, *etc.* Après l'examen clinique de base réalisé par le vétérinaire, il peut être intéressant de recourir au dosage de paramètres biochimiques et hématologiques et d'archiver ces résultats. Il est alors essentiel de connaître les normes, récapitulées dans le tableau 10 ci-dessous, pour être à même de détecter les anomalies.

TABLEAU 10 – Intervalles de référence en hématologie et biochimie sanguine chez le cheval Pur-sang (Desjardins et Cadore, 2006).

| Analyse | Unité | Chevaux Pur-sang |
|----------------------------|----------|------------------|
| HÉMATOLOGIE | | |
| Hématocrite | % | 32 à 53 |
| Erythrocytes | 1012/l | 6,8 à 12,9 |
| Hémoglobine | g / dl | 11 à 19 |
| Leucocytes | 109 / l | 5,4 à 14,3 |
| Neutrophiles segmentés | 109 / l | 2,3 à 8,6 |
| Neutrophiles non segmentés | 109 / l | 0 à 0,1 |
| Lymphocytes | 109 / l | 1,5 à 7,7 |
| Monocytes | 109 / l | 0 à 1 |
| Eosinophiles | 109 / l | 0 à 1 |
| Basophiles | 109 / l | 0 à 0,3 |
| Thrombocytes | 109 / l | 100 à 350 |
| BIOCHIMIE | | |
| Albumine | g / l | 23 à 39 |
| ASAT | UI / l | 138 à 409 |
| Bicarbonates | mmol/l | 20 à 28 |
| Bilirubine totale | µmol / l | 0 à 34,2 |
| Bilirubine indirecte | µmol / l | 3,4 à 34,2 |
| Bilirubine directe | µmol / l | 0 à 6,8 |
| Calcium | mmol / l | 2,8 à 3,4 |
| Chlore | mmol / l | 99 à 109 |
| CK | UI / l | 119 à 287 |
| Créatinine | µmol / l | 106,1 à 167,4 |
| Fibrinogène | g / l | 1 à 4 |
| Globulines | g / l | 34 à 40 |
| Glucose | mmol / l | 4,1 à 6,3 |
| LDH | UI / l | 162 à 412 |
| Magnésium | mEq / l | 1,8 à 2,3 |
| Phosphore | mmol / l | 1 à 1,8 |
| Potassium | mmol / l | 2,4 à 4,7 |
| Protéines totales | g / l | 57 à 79 |
| SDH | UI / l | 0 à 8 |
| Sodium | mmol / l | 132 à 146 |
| Urée | mmol / l | 3,6 à 8,6 |

3.1.2 Les tests d'effort

Des athlètes "monitorés"

Un test d'effort ou SET (*Standardised Exercise Test*) peut être décrit comme un moyen d'évaluer la capacité au travail physique d'un organisme. Divers paramètres que nous détaillerons par la suite sont mesurés pour objectiver la réponse de cet organisme à l'entraînement. En fonction des résultats, le cavalier ou l'entraîneur peut alors réadapter la programmation de la période de préparation, en ajustant la charge de travail ou l'espace-ment des sessions par exemple (Van Erck *et al.*, 2006).

Le but du suivi sur le long terme est de connaître le niveau de forme de l'athlète à un instant donné mais aussi sa progression par rapport aux objectifs à atteindre en vue des échéances. Cela permet d'affronter les épreuves en connaissance de cause et donc avec des risques limités, ce qui participe à préserver l'avenir sportif de son cheval en ne le confrontant pas à l'impossible.

Exploration des motifs de contre-performance

L'enquête de terrain sur les causes de contre-performance chez le trotteur de Van Erck *et al.* (2006) a comparé les tests à l'effort de 40 chevaux peu performants avec ceux de 8 chevaux performants, sains, de statut et de catégorie similaires. Un examen clinique poussé de ces chevaux est réalisé, notamment une endoscopie des voies respiratoires, une échocardiographie doppler et une prise de sang. Les paramètres hématologiques et biochimiques des analyses de sang des deux groupes ne montraient pas d'anomalies, à part une hausse des enzymes musculaires chez certains chevaux atteints de rhabdomyolyse. Plusieurs éléments se dégagent de cette étude :

- les paramètres enregistrés lors des tests à l'effort étaient significativement moins bons chez les chevaux peu performants, quelle que soit la cause de l'intolérance ;
- les chevaux souffrant de boiteries avaient des fréquences cardiaques plus élevées que le groupe témoin, probablement à cause de la douleur ressentie à l'effort ;
- les problèmes respiratoires entraînaient plutôt une hausse de lactatémie, plus importante que la hausse de FC ;
- les 4 causes majeures de contre-performance identifiées étaient les problèmes locomoteurs, cardiaques, musculaires et enfin un entraînement inapproprié par rapport aux exigences.

Toujours dans le cadre du suivi médicosportif, le test à l'effort permet ainsi d'explorer les causes d'une contre-performance ou simplement d'une baisse de forme ou inexplicquée, chez un cheval apparemment sain. Ces chevaux ne montrent en effet que très

rarement de signes cliniques au repos. En comparant les valeurs du test à l'effort réalisé aux valeurs de références déjà acquises pour ce cheval dans une meilleure période, il est possible d'investiguer l'origine du problème. Les paramètres incontournables de ces tests sont la **FC** et la **lactatémie**.

3.1.3 Sur tapis roulant ou sur piste ?

Les tests de terrain sur piste ne permettent de réaliser qu'un éventail limité de mesures mais ont l'avantage de simuler plus précisément les conditions naturelles de compétition (surface de course, nature de la piste, driver ou cavalier...) par rapport à un test sur tapis roulant. De plus, ils ne nécessitent pas de matériel coûteux ni d'acclimatation pour éliminer le facteur stress lié au tapis et peuvent même faire partie intégrante de la séance d'entraînement d'un ou de plusieurs chevaux en même temps.

Cependant, il ne peut pas y avoir de contrôle sur les conditions météorologiques et il est plus difficile de standardiser avec autant de précision que sur tapis roulant la vitesse et la durée de l'effort (Couroucé *et al.*, 1999, 2002). Enfin, Sloet et son équipe ont montré que l'effort est moindre sur tapis pour une même vitesse : pour se rapprocher le plus possible de la réalité du terrain, il faut augmenter la vitesse ou la pente du tapis (Sloet *et al.*, 1995, 1999).

3.2 La fréquence cardiaque

L'enregistrement de la FC constitue un moyen simple et fiable pour évaluer l'adaptation physiologique du cheval au cours d'un exercice. En effet, il s'agit d'un paramètre aisément mesurable, qui est actuellement reconnu comme étant un critère fiable d'appréciation de la condition physique (Art, Amory et Lekeux, 2000). Plus précisément, elle constitue un très bon indicateur de la puissance aérobie mise en jeu (Barrey *et al.*, 1990b).

3.2.1 Évolution de la fréquence cardiaque avec la vitesse

Lors d'un exercice physique, la FC augmente généralement très rapidement au début du travail, puis elle reste stable jusqu'aux trois quarts de l'effort. Après l'exercice, la diminution de la FC est très marquée pendant les premiers instants ; elle baisse de 25 bpm pendant les premières 5 minutes (Marsland, 1968).

En 1983, Wilson *et al.* ont montré que la réponse cardiaque à un exercice d'intensité croissante (quatre paliers de vitesse croissante) est linéaire entre 120 et 210 bpm (Figure 3.1). De nombreux auteurs comme Persson (1983), Demonceau *et al.* (1992), Couroucé (2000) et Art (2000) l'ont confirmé. Au-delà de cette fenêtre d'intensité d'exercice, la

fonction n'est plus linéaire et cela correspond à une approximation de la FCmax du cheval, jusqu'à 200 voire 240 bpm. Certains auteurs expliquent cette déflexion de la droite $FC = f(\text{Vitesse})$ par le fait que le muscle cardiaque n'a plus besoin d'augmenter sa fréquence de contraction à l'approche de VO_2 max car un surplus d'énergie provient de l'ATP produit par le métabolisme glycolytique anaérobie (Valette et Wolter, 1988).

La fréquence cardiaque, une fonction linéaire de la vitesse

$$FC = m \times V + n, \text{ avec :}$$

- FC = fréquence cardiaque (en battements/minute) ;
- m et n = constantes.
(Demonceau *et al.*, 1992)

Même si de nombreux facteurs peuvent influencer cette droite, celle-ci reste très précise et reproductible lorsqu'elle est mesurée au cours d'un exercice standardisé (Evans et Rose, 1988). On utilise actuellement couramment ce modèle pour évaluer les effets de l'entraînement sur les capacités athlétiques du cheval.

3.2.2 Effet de l'entraînement sur la fréquence cardiaque

Des effets multiples

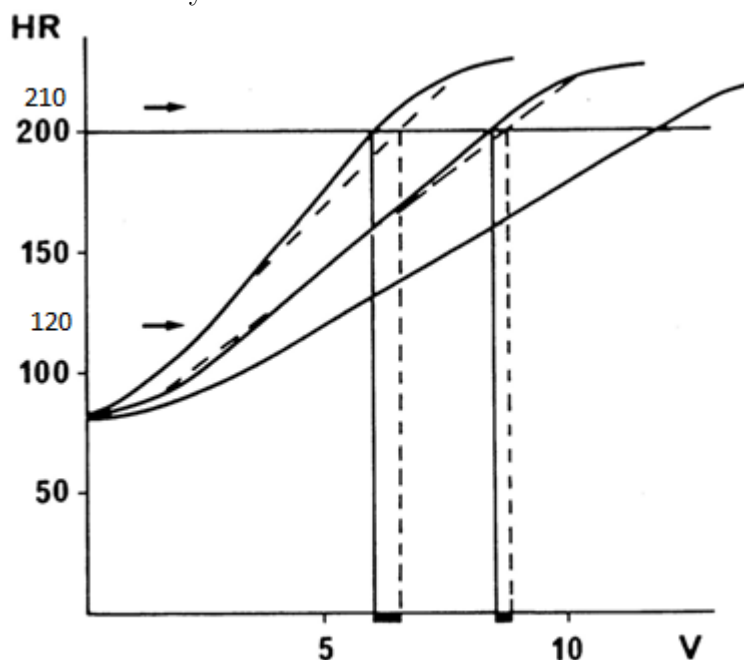
L'entraînement a pour effet général de diminuer la FC de repos, la fréquence cardiaque de récupération ainsi que la FC pendant un exercice submaximal (Marsland, 1968). Cela n'a rien de surprenant car la FC pour une charge de travail donnée reflète dans quelle mesure le système cardiovasculaire est adapté à cette intensité d'exercice. Cependant, l'entraînement n'engendre aucune amélioration en ce qui concerne la FCmax (Evans et Rose, 1988). Ces données peuvent être visualisées sur la figure 16.

FIGURE 16 – Relation entre la vitesse de course (V en m/s) et la fréquence cardiaque (HR) selon le niveau d'entraînement (Thornton, 1983).

Courbe de gauche : chevaux non-entraînés ;

Courbe centrale : chevaux faiblement entraînés ;

Courbe de droite : chevaux ayant subi un entraînement d'endurance.



L'entraînement a pour effet de décaler les courbes de $FC = f(V)$ vers la droite. Les flèches indiquent les limites approximatives de la linéarité de la réponse cardiaque. Les pointillés traduisent la surestimation de la vitesse correspondant à une FC de 200 bpm liée à la non-linéarité de la réponse cardiaque.

Fréquence cardiaque post-effort et récupération

La connaissance de la fréquence cardiaque post-effort présente un intérêt pour caractériser le niveau de récupération du cheval, notamment après des efforts intenses comme les courses. Chez des chevaux bien entraînés, la FC diminue de moitié entre 3 et 4 minutes 30 après l'arrêt de l'effort, par rapport à celle enregistrée à la fin de l'exercice (Valette et Bedu, 1990). Les normes de fréquence cardiaque post-effort après un travail intense sont les suivantes (Couroucé, 1993) :

- FC (à 5 min) = 80 à 100 bpm ;
- FC (à 10 min) = 60 à 80 bpm ;
- FC (à 15 min) = 40 à 60 bpm ;
- FC (à 30 min) = FC repos à 40 bpm ;
- FC (à 60 min) = FC repos.

Si la FC augmente avec l'intensité du travail, l'entraînement permet de diminuer cette fréquence pour un exercice donné, ce qui signifie que pour une même FC, une vitesse plus élevée est atteinte. L'adaptation du cheval à un exercice imposé se traduit en fin de période d'entraînement par un retour plus rapide de la FC à son niveau basal.

La FC représente donc un très bon indicateur de la puissance aérobie mise en jeu. Cependant, elle augmente également avec le stress ou la douleur. De plus, lorsque la puissance musculaire déployée devient maximale pendant une durée inférieure à 5 minutes, comme c'est le cas en course, la FC plafonne et ne permet plus de connaître avec exactitude la puissance énergétique demandée au cheval. On peut alors mesurer la concentration en acide lactique circulant dans le sang pour connaître la part d'énergie fournie par la voie anaérobie.

3.3 La lactatémie

3.3.1 Définition

Il s'agit de la concentration sanguine en acide lactique exprimée en millimoles par litre de sang. La lactatémie est, à chaque instant, le reflet de l'équilibre entre la production de lactate au niveau du muscle par la glycolyse anaérobie, le passage du lactate dans le sang et sa consommation par le muscle et le foie. La lactatémie témoigne de la participation au niveau musculaire des différentes voies métaboliques qui ont permis la réalisation de l'effort (Kirsch *et al.*, 2016). Notamment, elle reflète l'intensité relative de la dégradation anaérobie du glycogène et du glucose, par rapport à leur dégradation aérobie.

Toutefois, l'acide lactique est une molécule à demi-vie courte, d'environ 25 minutes après un exercice maximal. Sa concentration sanguine varie rapidement après l'arrêt de l'effort, ce qui nécessite que les prélèvements en vue d'une mesure de lactatémie soient effectués dans des conditions très précises. La mesure du lactate est actuellement universellement considérée comme un test fiable pour l'estimation de la condition physique et pour le suivi de son évolution avec l'entraînement (Fortier *et al.*, 2000).

3.3.2 Lien entre lactate musculaire et lactate sanguin

Devenir du lactate musculaire

Les échanges de lactate entre la cellule musculaire et le sang mettent en jeu des mécanismes complexes. Le fait d'avoir un pic d'acide lactique sanguin différé après la fin de l'effort témoigne du fait que le lactate ne diffuse pas librement à partir du muscle. Au

cours de l'effort, le lactate qui est produit au sein de la cellule musculaire subit différentes évolutions :

- lors d'effort de faible intensité, il peut s'accumuler sur place et pour une part subir un processus d'oxydation en étant incorporé dans le cycle de Krebs ;
- lorsque l'intensité de l'effort augmente, il peut diffuser dans l'espace extracellulaire où il est utilisé par d'autres fibres musculaires voisines ayant un métabolisme oxydatif plus marqué, notamment les fibres de type I ;
- lorsque les capacités d'absorption de l'ensemble des fibres musculaires sont saturées, l'acide lactique accumulé dans le compartiment musculaire diffuse alors vers le compartiment sanguin veineux efférent du territoire musculaire considéré (Couroucé, 1993).

Phénomène de saturation en acide lactique

Si la relation entre lactate musculaire et lactate sanguin semble linéaire pour des concentrations inférieures à 4 mmol/kg de muscle, au-dessus de ce seuil le flux devient constant. Le passage du lactate du muscle vers le sang nécessiterait donc un transporteur, qui deviendrait actif lorsque les cellules musculaires sont saturées en acide lactique : une quantité constante de lactate par unité de temps est alors déversée dans le sang depuis les muscles en contraction, et ce même lorsque la concentration en lactate musculaire continue d'augmenter (Jordfeld, Juhlind-Dannfelt et Karlsson, 1978). Ainsi, bien que tous les auteurs ne s'accordent pas sur les mécanismes de sortie du lactate hors de la fibre musculaire, il semblerait qu'un phénomène de saturation intervienne à partir d'un certain niveau de concentration intracellulaire.

En dépit de ces considérations, plusieurs équipes ont réussi à établir une équation liant la concentration en acide lactique sanguin immédiatement à la fin de l'exercice et la concentration au moment du pic. Même si la corrélation n'est pas parfaite, on peut estimer que la concentration sanguine en acide lactique, d'autant plus lorsqu'elle est maximale, est un indicateur fiable de la concentration musculaire en acide lactique à la fin de l'effort (Le Déroule, 1992). Il s'agit d'un moyen pertinent d'évaluer de façon indirecte la sollicitation énergétique de l'organisme.

Lactates et sang total

La concentration en lactate dans le sang ne dépend pas seulement de la libération de l'acide lactique par le muscle, mais aussi de son taux d'élimination à partir du sang, qui est influencé par de nombreux facteurs, entre autres le pH et la température. De plus, l'acide lactique n'est pas équitablement réparti dans les différents compartiments sanguins : il s'accumule préférentiellement dans le plasma par rapport au sang total pendant l'exercice (Persson *et al.*, 1995). L'étude des concentrations en lactate dans les globules rouges

et dans le plasma montre une divergence pendant l'exercice puis une convergence après l'exercice, ce qui suggère une équilibration graduelle entre le plasma et les globules rouges. Cependant, cette diffusion lente du lactate dans les globules rouges varie beaucoup selon les individus et l'état d'entraînement.

À cela s'ajoute le fait que l'hématocrite puisse passer de 42 % au repos à 63 % à l'effort, comme nous l'avons vu précédemment. Il faut donc réaliser les prélèvements après un échauffement pour éviter une mauvaise estimation de la lactatémie. Enfin, il est difficile d'établir une corrélation entre les concentrations plasmatiques et les indices de performances, alors même que les concentrations sanguines sont bien corrélées à ces indices.

Nous retiendrons que la mesure de la lactatémie sur sang total par rapport au plasma donne une meilleure image de l'accumulation des lactates dans le sang à partir du muscle suite à un exercice donné, et permet aussi d'éviter les problèmes liés à la distribution des lactates entre les différents compartiments sanguins.

3.3.3 Cinétique de l'acide lactique sanguin pendant l'effort

En 1983, Thornton *et al.* et Wilson *et al.* ont montré que la lactatémie suit une évolution de type exponentiel en fonction de la vitesse. Ce modèle a été confirmé par d'autres études, notamment celle de Demonceau *et al.* (1992), qui a exprimé la lactatémie en fonction de la vitesse par le modèle suivant :

La lactatémie, une fonction exponentielle de la vitesse

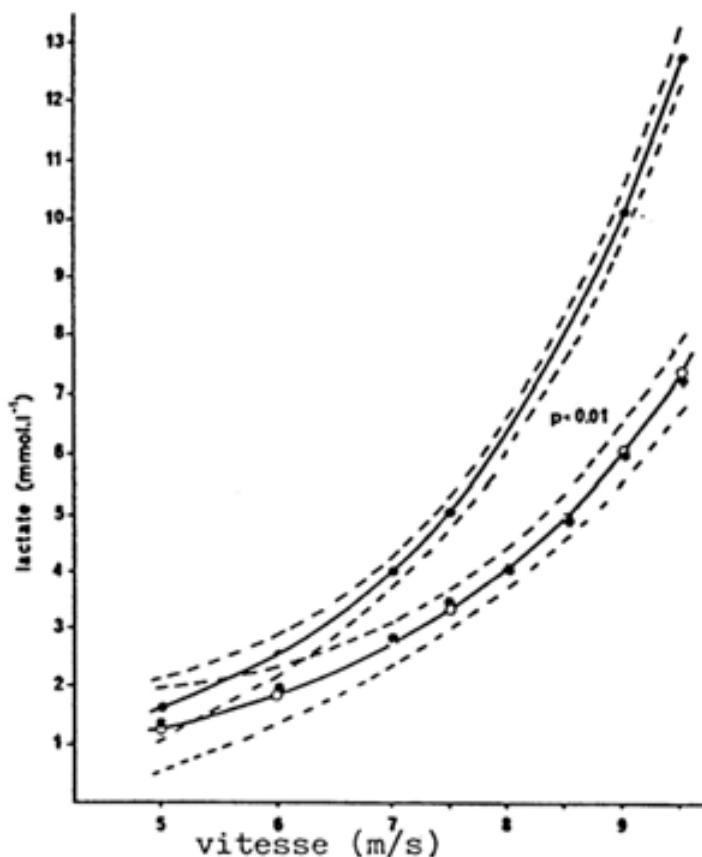
$La = e(AV+B) + C$ Avec :

- La = concentration sanguine en acide lactique en mmol/l;
- V = vitesse en m/min;
- A = coefficient de curvilinéarité spécifique de l'entraînement;
- B et C = constantes.

De plus, comme le présente la figure 17, l'entraînement modifie de façon marquée l'allure de la courbe $La = f(V)$: les chevaux entraînés ont une pente d'accumulation des lactates plus faible par rapport aux chevaux nonentraînés (Thornton *et al.*, 1983).

FIGURE 17 – Évolution exponentielle de la lactatémie en fonction de la vitesse selon le niveau d'entraînement (Thornton *et al.*, 1983).

Courbe de droite : chevaux entraînés; *Courbe de gauche* : chevaux non-entraînés.



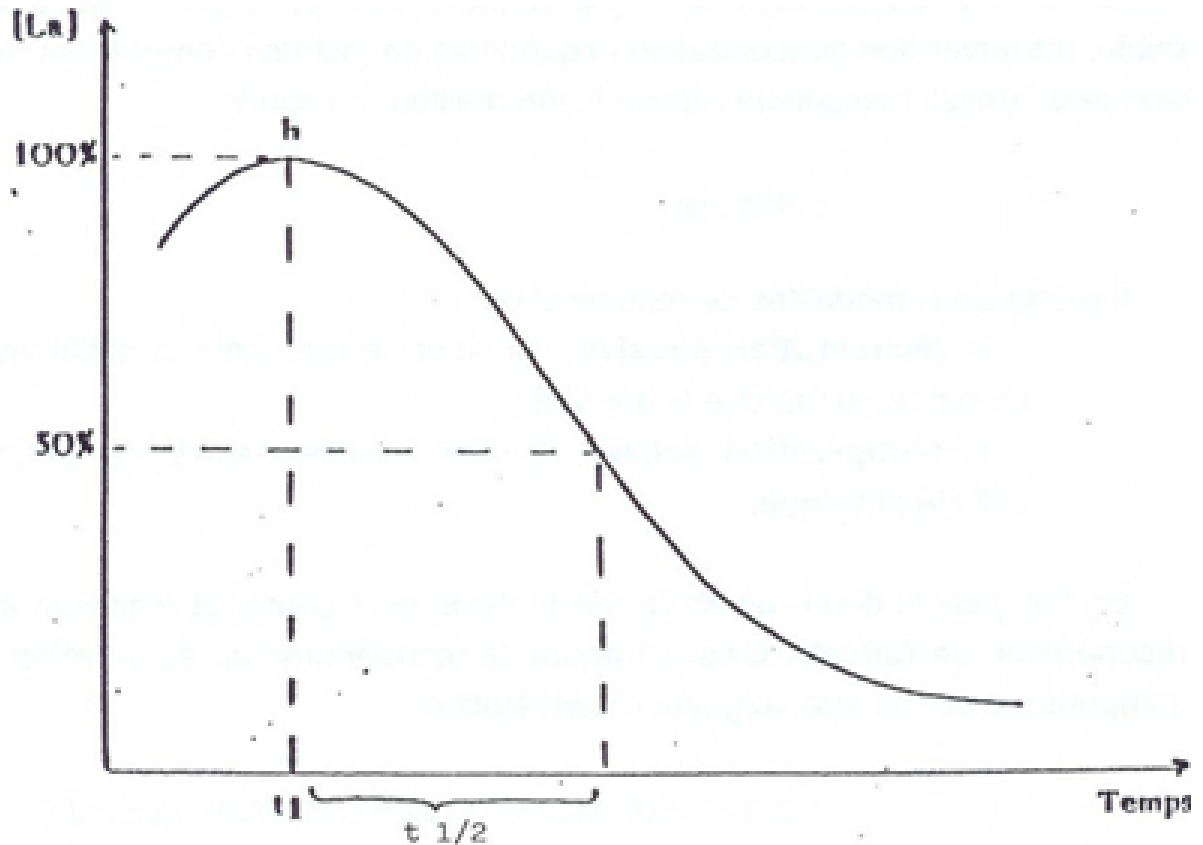
Accumulation d'acide lactique et phénomène de fatigue

Lors d'un effort intense, notamment en course, la lactatémie peut atteindre 25-30 mmol/l post-effort contre 0,4 mmol/l au repos. Cette accumulation d'acide lactique dans les muscles devient alors incompatible avec la physiologie de la contraction musculaire. Associée à la diminution du pH cellulaire, elle est responsable du développement d'un état de fatigue (Lovell *et al.*, 1987). Cette fatigue aigue est également due à l'inhibition de la glycolyse et à l'épuisement des stocks en glycogène, en créatine phosphate et en ATP (McMicken, 1983). C'est pourquoi l'utilisation de la voie des lipides pour produire de l'ATP en épargnant le glucose augmente la résistance du cheval à la fatigue.

3.3.4 Clairance de l'acide lactique sanguin après l'effort

Les études d'Auvinet *et al.* (1990b) ont permis d'établir un modèle de cinétique des lactates sanguins chez l'homme après un effort maximal ou supramaximal (Figure 18).

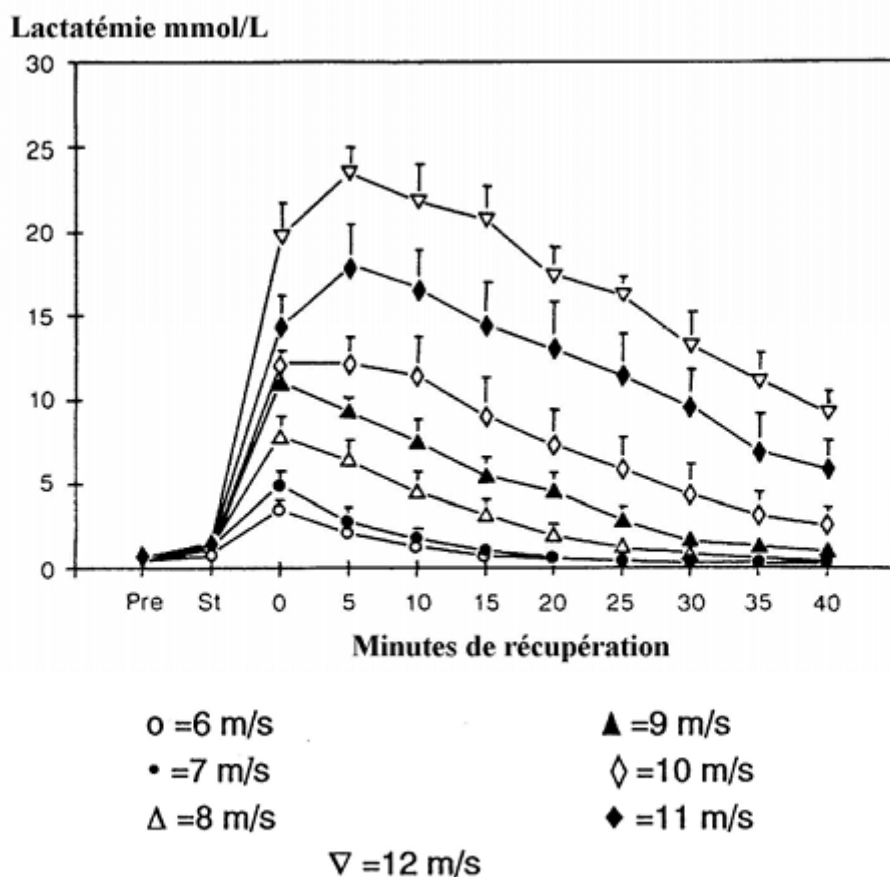
FIGURE 18 – Cinétique de la lactatémie (La) après un effort maximal ou supramaximal chez l'homme (Auvinet *et al.*, 1991b).



- La première partie de la courbe est ascendante jusqu'à une valeur maximale appelée pic de lactatémie, caractérisé par sa hauteur h et son temps d'apparition t_1 .
- La seconde partie de la courbe, descendante, correspond à l'élimination des lactates et elle est de type exponentiel. Elle se caractérise par la durée de demi-vie du lactate t_2 (temps nécessaire à la diminution de la concentration plasmatique en lactates sanguins de 50 %).

La plupart des auteurs pensent que ce modèle peut être transposé de l'homme au cheval. Cependant, l'étude de Marlin *et al.* (1991) sur la cinétique de la concentration d'acide lactique sanguin montre un tout autre résultat (Figure 19). Chez ces Pur-sang soumis à sept intensités d'effort sur tapis roulant, la clairance des lactates post-exercice suivait une cinétique d'ordre zéro et non pas exponentielle.

FIGURE 19 – Cinétique des lactates sanguins chez des chevaux soumis à différentes vitesses d'exercice sur tapis roulant incliné à + 5° pendant 40 minutes (Marlin *et al.*, 1991).
Pre : début de l'échauffement ; St : début de l'exercice.



3.3.5 Variations de la cinétique de clairance des lactates

Variation en fonction du type et de la durée de l'exercice

L'évolution de la lactatémie après un cross sur des chevaux de Concours Complet montre que la cinétique des lactates sanguins après l'effort dépend très largement de l'intensité de ce dernier : plus il est long et intense, plus le pic des lactates est important et retardé dans son temps d'apparition (Auvinet *et al.*, 1991b).

Variations en fonction du type de récupération

La récupération après l'effort peut être passive (cheval au repos ou marchant lentement) ou active (au trot ou au petit galop). La qualité de la récupération se mesure par le temps de demi-vie de l'acide lactique sanguin : plus il est court, plus la récupération est efficace. Les modalités de récupération influencent donc la cinétique de la lactatémie.

Marlin *et al.* (1987) et Lovell et Rose (1995) ont abouti à la conclusion que la récupération active permet d'éviter ou tout du moins de limiter l'accumulation durable d'acide lactique, par rapport à une récupération passive. La réalisation d'un effort modéré après un exercice plus intense permet une utilisation des lactates par le métabolisme aérobie, essentiellement par les muscles squelettiques, et donc une élimination plus rapide des lactates sanguins et musculaires.

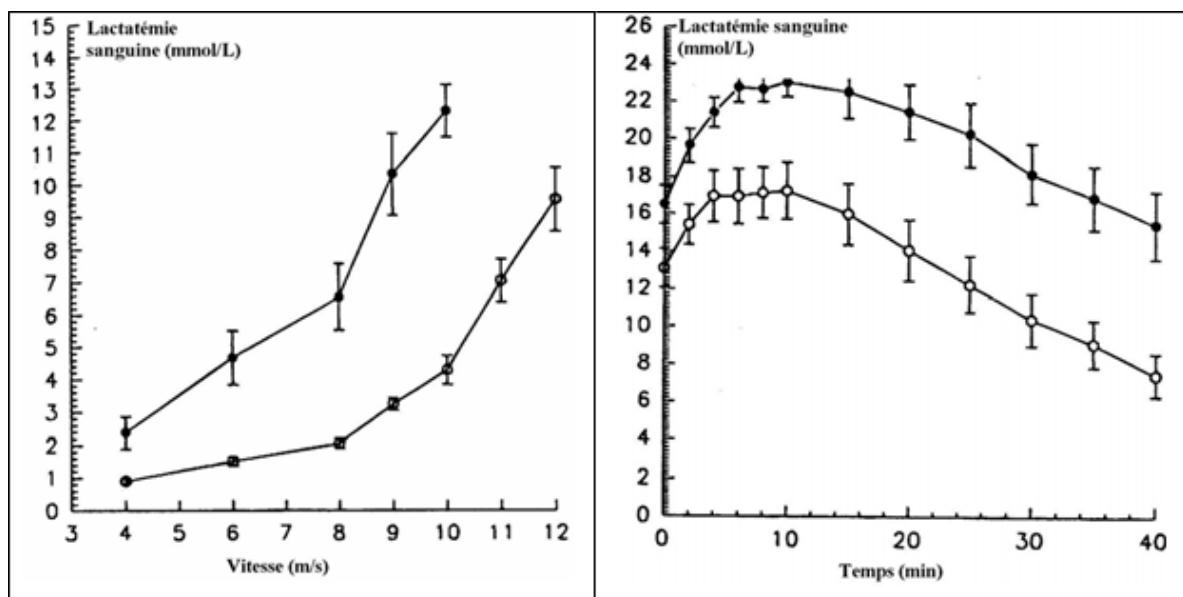
Variations en fonction de l'état d'entraînement

Chez les trotteurs, Couroucé *et al.* ont montré que l'entraînement a pour effet de diminuer la concentration sanguine en lactates pendant l'exercice, en augmentant la clairance métabolique de l'acide lactique (2002). Il s'agirait de l'expression d'une meilleure maîtrise de la **production aérobie d'énergie**, grâce à un transport plus efficace de l'oxygène aux muscles pendant l'exercice ou une augmentation de la consommation d'oxygène.

Cependant, d'autres études, comme celle de Rainger *et al.* (1994) (Figure 20) et Evans *et al.* (1995) contredisent ces résultats. Ces équipes ont observé des clairances de lactates sanguins qui ne diffèrent pas significativement entre les chevaux entraînés et nonentraînés. Cependant, ces études utilisent des méthodologies différentes (comparaisons chevaux « désentraînés »/nonentraînés, comparaisons de deux vitesses d'entraînement) qui pourraient expliquer les divergences relevées.

FIGURE 20 – Concentrations sanguines en lactates selon le niveau d'entraînement, avant et après un test à l'effort sur tapis roulant (Rainger *et al.*, 1994).

Courbe inférieure : chevaux entraînés ; *Courbe supérieure* : chevaux désentraînés ;
Gauche : phase d'exercice ; *Droite* : phase de récupération.



Par ailleurs, l'entraînement améliore aussi les capacités **anaérobies** et le pouvoir tampon du sang. En effet, lors d'efforts supramaximaux, une accumulation d'acide lactique plus importante est rendue possible par l'amélioration des systèmes tampon du sang qui permet au cheval entraîné de maintenir un pH sanguin élevé (Hodgson, Rose, Allen et Dimauto, 1985).

De façon générale, on peut retenir que l'allure de la cinétique de la lactatémie post-exercice est influencée par de nombreux facteurs, notamment par le type et la durée de l'exercice réalisé, le type de récupération, et par l'état d'entraînement du cheval. Des facteurs génétiques sont également à considérer.

3.3.6 En pratique : mesure de la lactatémie au « pic »

Combien de temps après la fin de l'exercice ?

Le « pic » de lactatémie est le point (ou plateau) de rencontre entre les phases ascendante et descendante de la cinétique de la lactatémie. S'il est facile à déterminer pour des efforts maximaux ou submaximaux, il peut être plus difficile à mettre en évidence lors d'efforts moins intenses (Jacobs, 1982).

Dans la littérature, il est très compliqué de comparer les valeurs car les différents auteurs ne réalisent pas leurs prélèvements sanguins au même moment post-exercice. Cela dit, certains ordres de grandeur peuvent être retenus. Au terme d'un effort d'intensité modérée, on observe un pic une minute après la fin de l'effort (Valberg, *et al.*, 1989) alors que pour un effort submaximal, il apparaît au bout de 5 minutes (Judson *et al.*, 1987) et jusqu'à 10 minutes après pour un effort maximal (Bayly *et al.*, 1989). En effet, le seuil d'accumulation sanguine d'acide lactique (SASAL) est alors franchi et la diffusion depuis le muscle continue au-delà de la fin de l'effort, ce qui implique que la lactatémie ne soit maximale qu'au cours de la phase de récupération (Marlin *et al.*, 1991).

Lactatémie maximale

D'autres différences importantes sont observées dans la littérature concernant la concentration maximale en acide lactique. Les variations d'un auteur à l'autre s'expliquent là encore par des divergences dans les modalités de prélèvement (temps écoulé entre la fin de l'exercice et le prélèvement), mais aussi par la diversité des chevaux étudiés et des exercices demandés (Tableau 11).

TABLEAU 11 – Synthèse bibliographique des concentrations sanguines maximales en acide lactique chez le Pur-Sang et le Trotteur après l'effort.

| Chevaux | Valeur du pic de lactatémie | Auteur | Date |
|-----------------|-----------------------------------------------|----------------------|------|
| Pur-Sang | 19,22 ± 1,56 à 24,5 ± 3,35 mmol/l | KUBO <i>et al.</i> | 1984 |
| | 20,6 à 30,9 mmol/l | HARRIS <i>et al.</i> | 1987 |
| | 26,5 mmol/l en moyenne | BAYLY <i>et al.</i> | 1987 |
| Trotteur | 11,3 mmol/l en moyenne (de 6,4 à 26,1 mmol/l) | ASHEIM <i>et al.</i> | 1970 |
| | 15,9 ± 0,4 mmol/l en moyenne | LINDHOLM et SALTIN | 1974 |
| | 19,7 ± 2,2 mmol/l en moyenne | AUVINET et DEMONCEAU | 1992 |

Le pic d'acide lactique ayant une durée de vie très limitée, même s'il se présente parfois sous forme de plateau, la réalisation d'une cinétique précise nécessiterait la réalisation de prélèvements rapprochés. En pratique, dans le cadre d'un suivi médico-sportif, on limite le nombre de prélèvements pour minimiser les risques liés à la manipulation, tels que des lésions de la veine jugulaire, le développement d'une réticence de l'animal... Pour cela, un seul prélèvement est effectué, au plus près de ce pic.

Cette valeur maximale de la lactatémie dépend surtout du type d'effort réalisé. Sa détermination permet donc de caractériser un exercice donné et mettre en évidence le métabolisme énergétique mis en jeu au cours de cet effort physique.

3.3.7 Lien avec les performances

Cet aspect a bien sûr surtout été exploré par rapport aux courses. Persson et Ullberg (1974) ont montré que chez les Trotteurs, une lactatémie basse après un exercice sub-maximal était positivement corrélée aux indices de performances en course. Il en est de même chez les galopeurs (Evans *et al.*, 1993). L'entraînement améliore donc les capacités aérobies musculaires et augmente la capacité de l'organisme à gérer sa production d'acide lactique. Cela retarde d'autant plus le moment où le SASAL est franchi. Par conséquent, la vitesse nécessaire pour franchir ledit seuil est d'autant plus importante que le niveau d'entraînement du cheval est élevé. Afin de comparer différents chevaux entre eux ou un même cheval dans des conditions différentes, il est donc nécessaire de définir de nouveaux paramètres permettant de caractériser le franchissement de ce seuil.

3.4 Les paramètres d'aptitude physique

3.4.1 Notion de seuils aérobie et anaérobie

Deux régimes énergétiques

Les chevaux soumis aux épreuves de **vitesse** présentent des réactions physiologiques de type défensives. 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 (Galloux, 2011).

À l'inverse, afin de poursuivre longtemps un effort d'intensité submaximale, chez le cheval d'**endurance** par exemple, l'organisme 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. L'apport global en oxygène à l'organisme est progressivement amélioré avec une fréquence respiratoire certes augmentée, mais de manière physiologique et proportionnelle à l'effort (pas de tachypnée hautement consommatrice d'énergie et inefficace) et une amplitude respiratoire augmentée afin d'optimiser la surface pulmonaire disponible (Marlin *et al.*, 1995).

Ainsi, en fonction des allures et de la vitesse du cheval, le métabolisme recruté est de type aérobie, anaérobie ou mixte.

Définitions

Dans le domaine de la médecine sportive du cheval, le concept de Kindermann (Kindermann, 1979) est largement accepté (Rieu, 1987) : la succession de ces différentes voies énergétiques au cours de l'effort permet de définir des seuils dits de Kindermann, qui divisent la cinétique de la lactatémie en trois zones :

- la première zone, de lactatémie inférieure à **2 mmol/l**, correspond à un métabolisme aérobie ;
- la deuxième zone, transitionnelle, de lactatémie comprise **entre 2 et 4 mmol/l** correspond à un métabolisme mixte : aéro-anaérobie ;
- la troisième zone, de lactatémie supérieure à **4 mmol/l**, correspond à un métabolisme utilisant majoritairement la filière anaérobie (mais pas exclusivement).

Le seuil aérobie est donc défini par une valeur de lactatémie de 2 mmol/l en deçà de laquelle la filière énergétique utilisée est aérobie. Concrètement, il représente la limite supérieure d'un travail aérobie strict, pour une $VO_2\text{max}$ de 60 % environ.

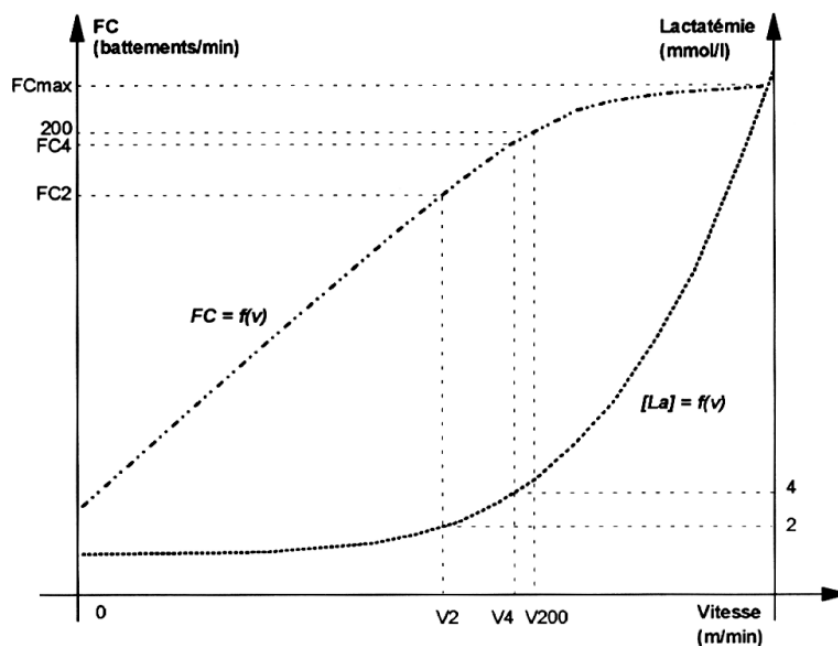
Le seuil anaérobie est quant à lui défini par la valeur seuil de 4 mmol/l au-delà de laquelle la filière énergétique utilisée est majoritairement anaérobie. Il représente le niveau de travail juste en dessous celui auquel l'acidose métabolique s'installe (Wilson *et al.*, 1983). Concrètement, le seuil anaérobie correspond à une intensité maximale de travail musculaire qui n'est soutenable pendant une longue durée sans apparition rapide du phénomène de fatigue (Barrey et Demonceau, 1990b). La $VO_2\text{max}$ correspondante est d'approximativement 85 %.

Émergence de nouveaux paramètres

À partir des variables mesurées lors des tests à l'effort (vitesse, fréquence cardiaque et lactatémie), des **paramètres dérivés** peuvent être calculés afin de comparer plusieurs chevaux entre eux ou encore un même cheval dans des conditions différentes, ou après période d'entraînement. Le tracé des droites $FC = f(V)$ et $La = f(V)$ permettent de déterminer deux paramètres d'aptitude physique (Figure 21).

FIGURE 21 – Évolution de la lactatémie et de la fréquence cardiaque en fonction de la vitesse et position des points V4 et V200 (Couroucé, 1993).

FC : fréquence cardiaque en battements par minute ; V : vitesse en m/min ; V4 : vitesse atteinte pour une lactatémie de 4 mmol/l ; V200 : vitesse atteinte pour une FC de 200 bpm.



Néanmoins, les notions de seuils sont à nuancer. En effet, le métabolisme aérobie ne s'arrête pas brutalement et le métabolisme anaérobie ne se déclenche pas non plus d'un seul coup. De plus, la production de lactate n'est pas forcément synonyme d'état anaérobie dans la mesure où un certain degré de glycolyse anaérobie et de phosphorylation oxydative se produisent en même temps à tous les niveaux d'exercice, la contribution relative de chaque voie dans la synthèse globale d'ATP variant en fonction de l'intensité de l'exercice. C'est pourquoi selon Bayly (1989), il faudrait préférer au terme « seuil anaérobie » l'emploi de l'OBLA (*Onset of Blood Lactate Accumulation*), correspondant au SASAL (Seuil d'Accumulation Sanguine d'Acide Lactique), qui reflète plus justement les processus métaboliques ayant lieu.

3.4.2 Rapport vitesse/lactatémie : le paramètre V4

Même s'il n'est pas possible de définir précisément le niveau de lactate auquel l'accumulation débute, la similarité des courbes de production de lactate chez l'homme et le cheval suggère que la valeur de 4 mmol/l peut être retenue comme une bonne estimation de la transition aéro-anaérobie (Wilson *et al.*, 1983).

Par ailleurs, il a été démontré chez le cheval que la répétition de paliers d'exercices induisant moins de 4 mmol/l de lactatémie ne provoquait pas d'accumulation lactique, tandis que la répétition de paliers induisant des lactatémies supérieures à 4 mmol/L entraînait une accumulation (Thornton *et al.*, 1985).

La V4 est en fait la vitesse correspondant au seuil anaérobie décrit précédemment. Ce paramètre a un intérêt considérable dans la détermination du niveau de travail qui peut être retenu dans un programme d'entraînement (Thornton *et al.*, 1985). En effet, à cette vitesse, qui correspond en général à 80-85 % de la vitesse max, le cheval travaille à la fois son métabolisme aérobie et anaérobie tout en évitant l'accumulation de lactates et le développement de fatigue.

La connaissance du paramètre V4, « seuil de fatigue » du cheval, permet ainsi d'évaluer sa résistance au cours d'un effort. Plus la V4 est élevée, plus l'accumulation d'acide lactique est retardée dans le temps et donc meilleure est le maintien du cheval. Ce paramètre est d'autant plus pertinent qu'il est directement corrélé au niveau de performance en course (Van Erck *et al.*, 2006).

3.4.3 Rapport vitesse/fréquence cardiaque : le paramètre V200

Comme nous l'avons décrit précédemment, la FC suit une relation linéaire en fonction de la vitesse, ce qui permet le calcul d'un paramètre de référence pour évaluer la réponse cardiaque à l'effort : la V200. Il s'agit de la vitesse à laquelle la fréquence cardiaque

est de 200 bpm. Elle correspond à une charge de travail proche de celle nécessitant une consommation maximale d'oxygène. La V200 sera d'autant plus élevée que le cheval est performant et tolère bien l'exercice (Demonceau *et al.*, 1992). Au contraire, cet indicateur sera bas lorsque l'exercice est mal toléré, dans le cas d'un entraînement insuffisant en amont ou d'une douleur locomotrice par exemple.

D'après Thornton (1985), la V200 est le paramètre de choix pour la comparaison de capacités cardiovasculaires. Le cheval à l'entraînement voit sa V200 augmenter. Dans le cas contraire, il faudra rechercher un problème sous-jacent. Il s'agit donc d'un bon moyen d'évaluer la préparation d'un cheval dans un contexte de suivi longitudinal. Dans le cas d'un cheval de sport, il est préférable d'utiliser la V170, voire V140 (vitesse correspondant à une FC de respectivement 170 bpm et 140 bpm) étant donné qu'ils atteignent beaucoup plus rarement 200 bpm dans leurs disciplines propres (Courroucé, 2000).

Par ailleurs, de nombreux auteurs (Wilson *et al.*, 1983, Persson, 1983, Demonceau et Auvinet, 1992, Courroucé *et al.*, 2002, Leleu, 2004a) ont montré que chez des chevaux adultes, la fréquence cardiaque correspondant à V4 est proche de 200 bpm en moyenne. Cette valeur semble donc représenter la FC au SASAL. Cependant, si la FC reflète correctement la charge de travail d'un cheval, il faut pas perdre de vue qu'elle peut aussi augmenter sous l'effet du stress et de la douleur.

Dans le cadre de l'évaluation du *fitness* et de la charge de travail, ce paramètre peut être associé à la FC à 5 et 10 min ou la durée nécessaire au retour à la FC initiale, surtout dans le cas d'exercices intenses. En effet, à la suite d'un travail plus léger, cette variable serait plutôt influencée par des facteurs extérieurs.

3.4.4 Tables de V4 et V200 et indices de performance

Il existe des tables, pour les chevaux de course notamment, répertoriant les normes de V4 et V200 des chevaux selon leur état d'entraînement et leur âge, ce qui permet de les classer par rapport aux objectifs (Tableau 12).

Nombreuses sont les études qui ont étudié les corrélations entre V4, V200 et les indices de performance en course : Courroucé *et al.*, 1997, Davie *et al.*, 2002, Leleu *et al.*, 2005. Une corrélation entre V4 et les gains en course de trot a pu être mise en évidence : si sa valeur est supérieure à la moyenne par tranche d'âge, dans 93,8 % des cas cela est corrélé à une bonne performance et bonne condition physique mais si elle est inférieure, dans 100 % des cas, il existe des affections sous-jacentes.

TABLEAU 12 – Valeurs moyennes et intervalles de confiance à 5 % de V4 et V200 à différents âges et états d'entraînement, calculées chez 194 trotteurs français réalisant 1105 tests d'efforts standardisés sur une piste d'une longueur de 720 m (Couroucé *et al.*, 2002).

| Age en années | Etat d'entraînement | V4 en m/min | V200 m/min |
|---------------|------------------------|-------------|------------|
| 1 | Début | 512 ± 7 | 498 ± 14 |
| 2 | Début | 525 ± 7 | 514 ± 12 |
| | Entraînement endurance | 548 ± 4 | 539 ± 6 |
| | Entraînement sprint | 569 ± 5 | 552 ± 8 |
| 3 | Entraînement endurance | 569 ± 5 | 572 ± 6 |
| | Entraînement sprint | 586 ± 13 | 585 ± 10 |
| | Course | 606 ± 4 | 599 ± 6 |
| 4 | Entraînement endurance | 595 ± 6 | 601 ± 10 |
| | Entraînement sprint | 609 ± 8 | 615 ± 11 |
| | Course | 619 ± 5 | 619 ± 6 |
| 5 | Entraînement endurance | 599 ± 11 | 613 ± 12 |
| | Entraînement sprint | 615 ± 8 | 620 ± 8 |
| | Course | 627 ± 4 | 631 ± 6 |
| 6 | Entraînement endurance | 605 ± 8 | 622 ± 11 |
| | Entraînement sprint | 609 ± 12 | 635 ± 17 |
| | Course | 634 ± 7 | 645 ± 8 |

Les paramètres V4 et V200 sont significativement meilleurs pour les chevaux d'élite par rapport aux chevaux moyennement performants, qui ont eux-mêmes de meilleurs paramètres que les chevaux peu performants. On retiendra que chez un cheval sain, les deux variables doivent être très proches. Si V200 est inférieure à V4 de plus de 20 m/min, il faut rechercher préférentiellement un problème locomoteur, car la FC est trop élevée (douleur).

3.5 Autres mesures de paramètres de terrain ou sur tapis roulant

Il apparait ici que le suivi de la FC pendant l'effort et celui de la lactatémie après l'effort permet d'estimer simplement et de façon fiable la condition physique du cheval. Il existe néanmoins d'autres paramètres intéressants à prendre en compte.

3.5.1 Les enzymes musculaires

Le suivi médicosportif peut s'accompagner du dosage sanguin des enzymes musculaires au cours d'une période de vingt-quatre heures après le travail.

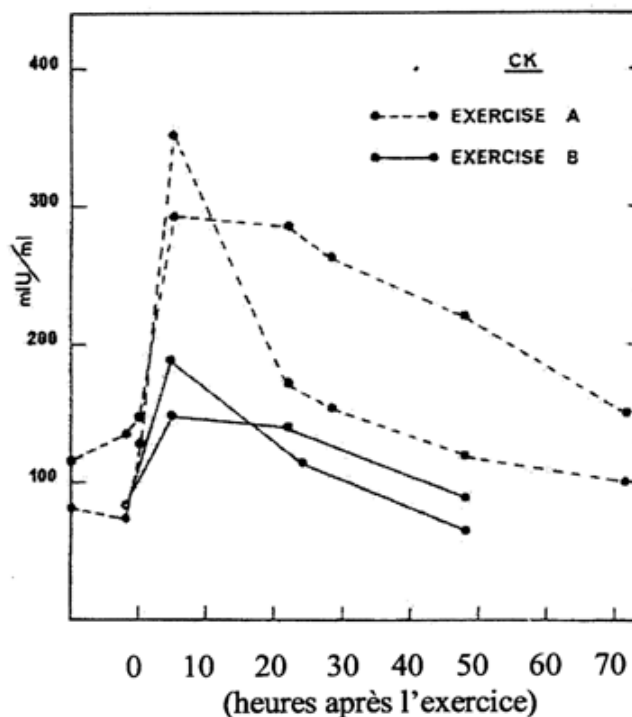
La teneur plasmatique en créatine phosphokinase

La créatine kinase (CK) est l'enzyme qui catalyse la réaction de phosphorylation de la créatine dans la cellule musculaire. Elle se retrouve augmentée dans le compartiment sanguin en cas de lyse de fibres musculaires. Au repos, les valeurs de CPK plasmatique sont inférieures à 350 UI/l chez le cheval. Tout exercice est suivi d'une augmentation temporaire de CPK plasmatique, cette augmentation étant d'autant plus importante que l'exercice est intense. La concentration sanguine en CPK atteint une valeur maximale environ cinq heures après l'exercice et, pour un cheval en bonne condition physique, les valeurs de repos sont retrouvées en deux jours environ (Valberg *et al.*, 1993). La figure 22 présente l'impact de deux exercices d'intensité croissante sur la concentration de CPK sanguine post-effort.

FIGURE 22 – Les effets de l'exercice sur la concentration de créatine kinase (CK) plasmatique chez 4 chevaux (Anderson, 1975).

Exercice A : 8 km de trot + 4 km de petit galop + 8 km de galop = 20 km ;

Exercice B : 4 km de trot + 2 km de petit galop + 4 km de galop = 10 km.



L'élévation du taux de CK plasmatique varie en fonction de l'intensité de l'exercice effectué et sa valeur post-exercice nous renseigne globalement sur l'état de fatigue de la cellule musculaire.

L'aspartate aminotransférase

L'aspartate aminotransférase (ASAT), quant à elle, bien que peu spécifique puisque présente dans les muscles, le foie et le myocarde, présente une activité augmentée en cas d'affections musculaires. Elle doit être mesurée à 24h post-exercice, selon Munster *et al.* (2013).

La lactate déshydrogénase

La lactate déshydrogénase (LDH) catalyse la transformation de l'acide pyruvique en acide lactique. Bien qu'elle soit aussi peu spécifique (elle est essentiellement présente dans les muscles mais aussi dans le foie), certains auteurs observent une augmentation de l'activité sérique de la LDH proportionnelle à l'intensité de l'exercice. Cette augmentation est plus importante pour les chevaux non entraînés que pour les chevaux entraînés (Goupil, 1990).

3.5.2 Hématologie et biochimie

- La mesure de l'**hématocrite**, de la concentration en hémoglobine et du taux de globules rouges et blancs est fréquemment utilisée en médecine sportive pour détecter un sous- ou un sur-entraînement. En effet, l'entraînement s'accompagne généralement d'une augmentation de la concentration en globules rouges et hémoglobine. Les paramètres de la lignée rouge apparaissent comme de bons marqueurs d'un potentiel à développer un effort en aérobie (Fortier et Courroucé, 2000).
- Plusieurs **indices biochimiques** peuvent également être surveillés dans le cadre d'un suivi médicosportif. En effet, l'urée et la créatinine sont de bons indicateurs des dysfonctionnements rénaux qui peuvent survenir après un effort très intense (en particulier chez les chevaux d'endurance). Cependant, la plupart des paramètres biochimiques à l'exception des lactates ne sont que peu ou pas modifiés par l'entraînement. Par ailleurs, la variation de l'ionogramme est un phénomène normal pour un cheval à l'effort. L'entraînement permet de réduire l'amplitude de ces variations et assure un retour plus rapide aux valeurs de repos (Démonceau *et al.*, 1992).

3.5.3 Les gaz sanguins

La mesure des gaz sanguins sur sang artériel permet de vérifier que l'apport en oxygène est correct. En effet, l'hypoxie et l'hypercapnie, dans un contexte d'affection respiratoire,

peuvent expliquer une intolérance à l'effort. Il est possible de prélever du sang dans l'artère transverse de la face via un cathéter obturé pendant l'effort pour mesurer les pressions partielles en O₂ et CO₂ et objectiver les échanges gazeux à chaque palier d'intensité. Le prélèvement doit être analysé le plus vite possible afin de bloquer les échanges. La mise au froid permet de gagner un peu de temps. Dans tous les cas, les résultats doivent être corrélés à la température centrale (Couroucé, 2002).

3.5.4 L'électrocardiogramme

L'électrocardiographie (ECG) fournit un tracé fiable de l'activité électrique du cœur aussi bien au repos qu'en situation d'effort. Les éléments à analyser sont la régularité du tracé, le rythme, la fréquence cardiaque, et la présence d'ondes anormales éventuelles d'après "Télévet-Web".

3.5.5 La VO₂max

L'entraînement étant à l'origine d'une amélioration de la VO₂max, son objectivation permettrait le suivi des progrès, en évaluant le niveau de synthèse aérobie de l'ATP et le coût énergétique d'un exercice. En dépit de l'importance du débit ventilatoire, il existe un système embarqué Cosmed K4b2 R qui, associé au masque Equimask R, permet de mesurer les échanges gazeux en mode cycle à cycle réel (Art, 2006). Son coût élevé explique que ce dispositif ne soit pas utilisé en routine pour les tests standardisés, d'autant plus que la mesure de la VCO₂ n'est pas validée. Il est à noter également que le cheval s'habitue difficilement au port du masque, inévitablement volumineux. De plus, si la VO₂max est un paramètre très héritable, il demeure une grande variabilité individuelle pour ce qui est de l'amélioration par l'entraînement (Barrey, 1992). Heureusement, la capacité maximale aérobie peut être estimée grâce à la mesure très fiable et non invasive de la FC max.

3.5.6 Le cas du surentrainement

Le surentrainement est un facteur important de contre-performance chez le cheval. C'est une notion difficile à définir tant elle englobe des signes divers et variés. Les principaux signes d'appel sont : fatigue, perte de poids, baisse de performance, inappétence, nervosité, tachycardie, douleurs musculaires et sudation augmentée (McGowan *et al*, 2002). La mesure de ce surentrainement est fondée sur l'observation de l'animal, de son comportement et de sa réponse à l'exercice, ce qui explique qu'elle soit difficile à objectiver. Les tentatives mises en œuvre pour déterminer un facteur biochimique ou hématologique capable de mettre en évidence ce surentrainement demeurent à ce jour infructueuses (Golland *et al*, 2003)

Le suivi de la FC et de la lactatémie constituent donc deux indices complémentaires et faciles à mesurer pour déterminer l'aptitude d'un cheval-athlète (Barrey et Demonceau, 1990b). Pour reprendre les mots de Galloux (1991), avec la FC comme "compte-tours" et la lactatémie comme "économètre", pour savoir si l'on travaille au-dessus de ses moyens, il est possible d'avoir une bonne estimation de l'athlétisme du cheval. Cependant, la seule investigation du métabolisme énergétique se révèle insuffisante pour complètement appréhender la réponse d'un cheval à l'effort.

4. CHARGE DE TRAVAIL ET CAPTEUR *EQUISENSE MOTION*

Les nouveaux outils d'entraînement et de suivi médico-sportifs que sont les tests standardisés sont de plus en plus utilisés dans le cadre professionnel mais peu de cavaliers au sens large ont aujourd'hui accès à de telles données. Equisense cherche à mettre au point un algorithme de charge de travail « grand public » à intégrer au capteur *Motion*, qui permette d'affiner leur gestion des entraînements en objectivant l'intensité d'un effort sans avoir recours aux tests physiologiques. Nous reviendrons ici sur la définition de la charge de travail et sur les principales études concernant ce paramètre avant de présenter le capteur *Motion*, à l'origine de notre étude.

4.1 La charge de travail, un paramètre complexe

4.1.1 Définitions : dépense énergétique, intensité et charge de travail

Dans une optique de quantification d'un effort dans le cadre de l'entraînement, de nombreuses questions font surface. Faut-il quantifier : la dépense énergétique, l'intensité, la charge de travail ? A quoi renvoient exactement ces différents termes ? Cet indicateur doit-il être dépendant du cheval, des conditions extérieures ? Doit-il quantifier les exercices effectués ou la difficulté du cheval à les réaliser ?

La dépense énergétique

Tout mouvement corporel produit par les muscles squelettiques induit une dépense énergétique additionnelle à la dépense énergétique incompressible due au métabolisme basal (en kcal/min). Quantifier la dépense énergétique à l'effort reviendrait à mesurer l'énergie chimique utilisée pendant l'effort, mais les modalités de cette mesure font largement débat (Galloux, 2011). En effet, de très nombreux paramètres rentrent en ligne de compte dans la consommation d'énergie, dont la manière de réaliser un exercice (chaines musculaires mises en jeu, puissance développée . . .), les conditions de stress ou l'exigence de la part du cavalier, *etc.*. Prenons l'exemple d'une promenade au pas de 30 min : elle

peut induire une dépense énergétique très faible, comme beaucoup plus importante si le cheval est stressé, ou si le cavalier exige de lui une attitude musculairement éprouvante. Une autre option consiste en l'évaluation de l'intensité de l'effort.

L'intensité de l'effort

L'intensité peut être calculée de différentes manières, notamment en % FC max ou en % VO₂max. L'avantage de raisonner en intensité relative et non absolue (quantité d'énergie dépensée pendant une période de temps donnée) est de prendre en compte les différences interindividuelles de composition corporelle, de sexe et d'aptitude aérobie. Une autre méthode consiste à effectuer un rapport entre la dépense énergétique liée à l'effort en question et la dépense énergétique de base, évaluée à 3.5 ml d'O₂/min/kg. Cette dépense énergétique au repos s'appelle l'équivalent métabolique (MET).

1 MET = consommation de 3,5 ml d'O₂/min/kg.

Chez l'homme :

- entre 2 MET et 4 MET : activité physique faible ;
- entre 5 MET et 7,5 MET : activité modérée ;
- > 7,5 MET : activité intense.

En somme, plus le nombre de MET est élevé, plus l'activité est intense. Pour Barrey, la définition de l'intensité de l'effort physique se résume à la relation suivante :

Intensité = Dépense énergétique / Durée de l'effort (Barrey, 1992)

Cela expliquerait qu'une course de plat de 2400 m à grande vitesse soit un effort très intense alors qu'une course d'endurance de 100 km à vitesse moyenne reste un effort d'intensité modérée : dans le premier cas la dépense énergétique importante est relativisée par une courte durée par rapport à l'effort de fond. Le développement des tests standardisés a permis d'aboutir à une classification de l'intensité selon les paramètres physiologiques du cheval à l'effort (Tableau 13).

TABLEAU 13 – Bilan des différents indicateurs d'intensité du travail selon les auteurs.

VO₂max : consommation maximale en oxygène ; bpm : battements par minute.

| Intensité | % VO ₂ max | Lactatémie (mmol/l) | Fréquence cardiaque (bpm) |
|------------|-----------------------|---------------------|---------------------------|
| Faible | < 55 % | < 2 | < 100 |
| Modérée | 55 % | 2 à 4 | 120 à 150 |
| Importante | 80 à 100 % | > 4 | > 150 |
| Auteurs | Clayton, 2013 | Barrey, 1994 | Authie, 2011 |

Charge de travail d'une séance

Plutôt que de parler d'intensité, on peut se limiter à l'évaluation de la charge de travail (*workload* en anglais), qui quantifie les exercices effectués sans tenir compte de l'attitude ni de l'état émotionnel du cheval, et sans parler de calories dépensées (Authie, 2011). Il s'agirait donc de grader l'activité physique selon ce qui a été effectué, en s'affranchissant de la condition physique du cheval.

Par exemple, une promenade au pas de 20 min correspondrait à une charge de travail de 1/10 alors que la note pour une séance d'obstacle d'une heure comptabilisant 30 sauts s'élèverait à 6/10. Une course d'endurance de 160 km atteint le score de 10/10. L'intérêt est de noter la charge de travail de manière relative et non absolue : pour chaque travail d'un cheval en particulier, on attribue une note par rapport à ce qu'il réalise d'habitude. En effet, la notation absolue pose le problème de la définition du maximum. Prendre un effort trop intense comme maximum, très éloigné des objectifs sportifs du cheval, relèguerait toutes les séances classiques au score de 2/10.

La difficulté de mesure de la charge de travail a été comparée à la description d'un voyage de Lyon à Milan par Rogers *et al.* en 2007. Sur une carte géographique, ce trajet correspondrait à une ligne droite mais topographiquement, il faudra traverser les Alpes. L'hésitation de la communauté scientifique équine à adopter une mesure quantitative de la charge de travail s'explique par cette difficulté à identifier les indicateurs de terrain à prendre en compte.

Les **paramètres incontournables** dans une étude de charge de travail sont :

- le type de travail réalisé et les paliers choisis (tapis roulant, travail monté, *etc.*) ;
- la vitesse et la manière de la déterminer (GPS, chronomètre, *etc.*) ;
- la durée ou la distance du travail ;
- la fréquence du travail ;
- la nature du sol (herbe, sable, caoutchouc, *etc.*).

D'autres variables sont **intéressantes** lorsque disponibles :

- la FC et son moyen de mesure ;
- la $VO_2\text{max}$ /consommation d' O_2 et leurs moyens de mesure ;
- la lactatémie mesurée sur sang total ou plasma ;
- l'équilibre acido-basique du sang (pH, pCO_2 , excès de base).

La difficulté reste alors de savoir quels paramètres prendre en compte en priorité parmi tous ceux que l'on peut mesurer et comment les pondérer entre eux.

4.1.2 Un paramètre clé pour la gestion des chevaux de sport

L'entraînement physique a des objectifs multiples, selon Rogers *et al.* (2007) :

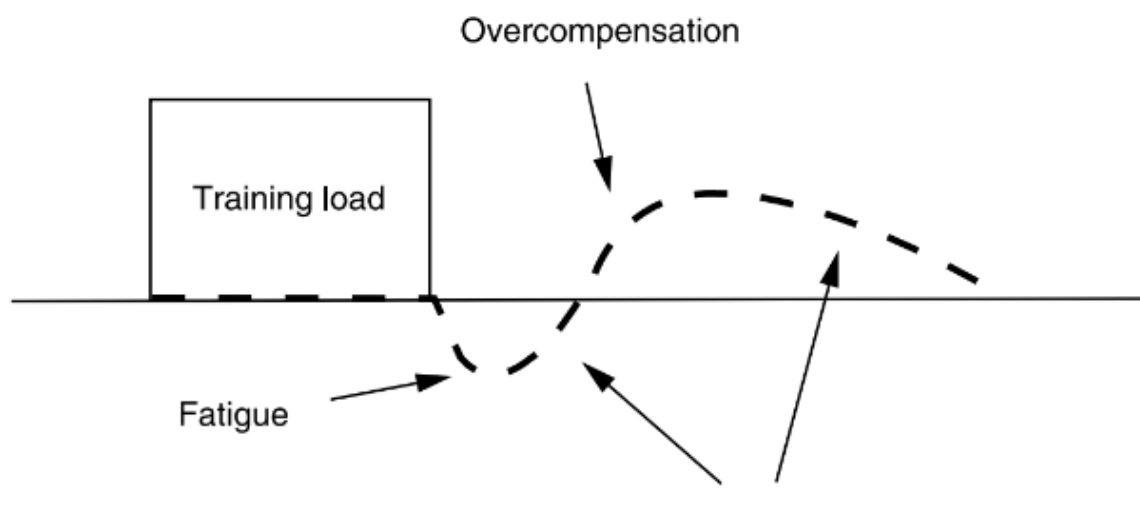
- améliorer ou seulement maintenir la performance maximale ;
- reculer le seuil de fatigue ;
- améliorer les capacités ;
- minimiser l'incidence des blessures ;
- maintenir la volonté et l'enthousiasme à l'exercice.

Le but du conditionnement est de stimuler des adaptations physiologiques de l'organisme du cheval pour améliorer la performance. Cependant, il ne faut pas perdre de vue que le cheval est un athlète qui, bien qu'extrêmement doté par la nature, reste fragile, fatigable et non motivé par le résultat. L'alternance des périodes d'exercice et de repos doit être bien pensée car la réponse du cheval à l'exercice peut être positive ou négative selon l'intensité et la fréquence des stimuli au niveau physique mais aussi mental (Galloux, 2011). Reprenons quelques principes essentiels de l'entraînement.

Un principe basique d'entraînement physique est qu'un exercice unique est suivi de fatigue associée à un dommage cellulaire modéré, qui résulte en une réponse adaptative à court terme (Figure 23).

FIGURE 23 – [Effet d'une séance d'entraînement, récupération et performance (Rogers *et al.*, 2007).

Ligne en pointillés : courbe de performance ; *training load* : exercice d'entraînement ; *overcompensation* : gain de performance ; *recovery* : récupération.



La fatigue suit directement l'exercice (*training load*) et la performance (ligne en pointillés) diminue mais lorsque le cheval se repose, il récupère non seulement son niveau de performance de base mais aussi une capacité supplémentaire. Il s'agit du phénomène de surcompensation (*overcompensation*). Si la période d'inactivité s'allonge, le cheval se réadapte, de la même façon, et revient à son niveau initial. Le gain de l'adaptation précédente est alors perdu.

Au contraire, si cet exercice est réalisé régulièrement et que le stimulus est augmenté graduellement, l'adaptation pendant la période de récupération améliore progressivement la performance (Figure 24). Cependant, si charge de travail est constante avec des pauses correctes, cela n'entraîne pas d'amélioration des performances. Sans temps de récupération suffisant, cela engendre même une baisse des performances. En effet, un mauvais équilibre entre le stress du travail et la récupération ne laisse pas le temps à l'organisme de mettre en place les adaptations attendues suite à la première session et le cheval ne sera pas dans de bonnes conditions pour affronter le second exercice (Rogers, 2007).

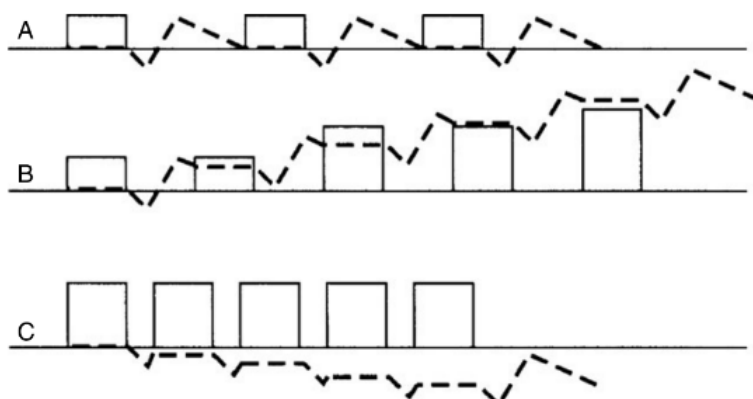
FIGURE 24 – Différentes stratégies d'entraînement, récupération et performance (ligne en pointillés) (Rogers *et al.*, 2007).

Ligne en pointillés : performance ;

Ligne A : niveau d'exercice constant (taille des rectangles) avec récupération correcte (espacement des rectangles), pas de gain de performance à long terme ;

Ligne B : bonne optimisation de l'entraînement avec un niveau d'exercice croissant et une récupération correcte, gain de performance ;

Ligne C : exercices trop intenses et trop fréquents à l'origine d'une fatigue physique, chute des performances.



Il faut donc apporter continuellement un nouveau niveau de stress à chaque exercice tout en respectant les temps de repos, dans une mesure raisonnable car il existe évidemment une limite supérieure qui correspond au risque de blessure et d'épuisement. De plus, en raison de la grande variabilité individuelle dans la gestion de l'augmentation des niveaux de stress, certains chevaux peuvent se désintéresser du travail, voire développer des réticences.

Pour faire varier le niveau de stress d'une séance d'entraînement, il est possible de jouer sur plusieurs leviers :

- **le type d'exercice** ;
- **la longueur totale de la période d'entraînement**, qui dépend de la condition initiale du cheval mais aussi du niveau d'épreuves auquel il est destiné. Mis à part quelques modifications au début de l'entraînement, les adaptations majeures n'interviennent qu'au bout de 10 à 15 semaines ;
- **l'intensité du stress**, en pourcentage de la $VO_2\text{max}$. Celle-ci doit être croissante et accompagnée d'un allongement de la période de récupération en conséquence pour permettre la réparation du tissu musculaire ;

- **la durée d'une séance**, qui permet à une vitesse donnée (même intensité), d'augmenter la capacité aérobie. En général, pendant la préparation aux courses, la durée de l'exercice est augmentée de 10 % chaque semaine pendant les 10 premières semaines ;
- **la fréquence des sessions**. Lors d'un exercice maximal, le métabolisme musculaire étant multiplié jusqu'à 100 par rapport au repos, des dommages cellulaires dus aux radicaux libres peuvent persister jusqu'à 96 h après l'effort. Il est donc nécessaire d'attribuer aux muscles le temps de se remodeler mais sans non plus permettre qu'il revienne à son état initial. Il n'a pas été mené d'étude à proprement parler mais la majorité des chevaux athlètes sont travaillés 5 fois par semaine (Galoux, 1991). Cela correspond au fait que les entraîneurs recherchent un programme le plus léger possible pour les meilleurs résultats.

4.2 Études préalables sur la charge de travail chez le cheval de sport

Une bonne description de la charge de travail des différents types de séances est permise par l'acquisition des FC moyennes et maximales et des pics de lactatémie. La charge de travail étant désormais quantifiable de façon reconnue par ces paramètres physiologiques, de nombreux chercheurs se sont livrés à l'étude de l'influence de diverses méthodes d'entraînement sur la charge de travail (obstacle *versus* plat, rênes ajustées *versus* rênes longues) mais aussi de différents paramètres extérieurs comme le poids du cavalier, le lestage par un poids mort, la nature des sols et leur profondeur, le climat, *etc.*

4.2.1 Technique d'équitation et charge de travail

La communauté équestre est très préoccupée par l'efficacité des techniques de travail et notamment les pratiques moins conventionnelles telles que le *rollkür* : le cheval est monté avec un port d'encolure très rond et bas. Certains cavaliers le pratiquent à l'entraînement et en échauffement avant les compétitions en recherchant un effet d'étirement et de musculation du dos, en prévention des blessures, d'après "Europe Dressage". La question qui se pose est de savoir si elle peut être utilisée sans remettre en cause le bien-être de l'animal. Sloet van Oldruitenborgh *et al.* (2006) ont réalisé des tests à l'effort sur huit chevaux d'école dans cette attitude particulière *low, deep and round*, par comparaison avec une position spontanée de la tête, sans contrainte (Figure 25). La première était obtenue par l'action d'un enrênement de type rênes allemandes et la seconde, avec un contact minimal avec la bouche du cheval.

FIGURE 25 – Position de la tête du cheval dans l'étude de Sloet van Oldruitenborgh *et al.* (2006).

A : monte *rollkür* ; B : monte sans contrainte.



L'analyse de la FC (Figure 26) et de la lactatémie (Figure 27) lors de ces tests à l'effort a montré que la charge de travail n'était que très légèrement augmentée en *rollkür*. De même l'analyse du cortisol a révélé une absence de gêne ou de stress. Au contraire, les chevaux se déplaçaient mieux et se montraient plus attentifs à leur cavalier.

FIGURE 26 – Évolution de la fréquence cardiaque à l'effort en fonction du port de tête (Sloet van Oldruitenborgh *et al.*, 2006).

Courbe rouge : monte *rollkür* ; Courbe verte : monte sans contrainte.

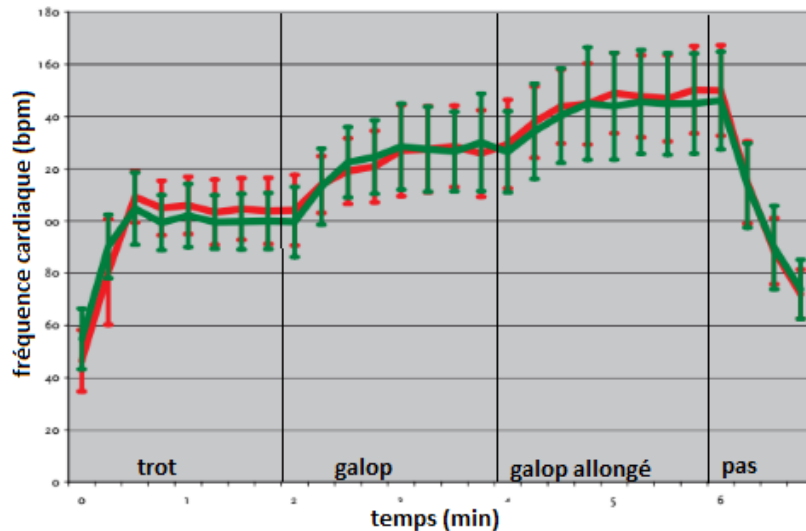
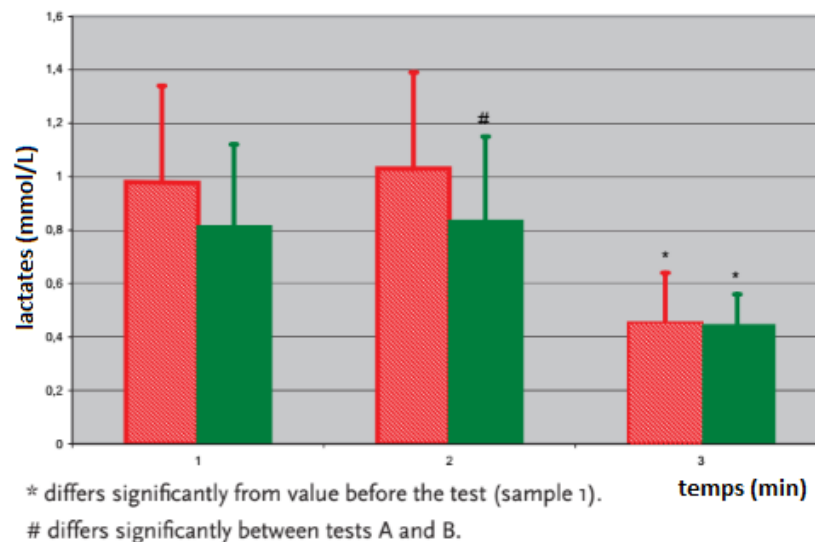


FIGURE 27 – Évolution de la lactatémie à l'effort en fonction du port de tête (Sloet van Oldruitenborgh *et al.*, 2006).

Courbe rouge : monte *rollkür* ; Courbe verte : monte sans contrainte ;

1 : avant l'exercice ; 2 : juste après ; 3 : après récupération.



Cependant, il serait intéressant de continuer cette étude car la position *low, deep and round* est parfois exagérée par certains cavaliers jusqu'à ce que le nez du cheval soit ramené jusqu'au poitrail, non seulement à l'entraînement mais aussi dans le cadre de compétitions internationales (Figure 28). Il est probable que cela ait un impact plus grand sur le confort et la charge de travail, même si cela reste compatible avec la performance.

FIGURE 28 – *Rollkür* prononcé chez un cheval de dressage (d'après "Europe Dressage").



4.2.2 Effet du nombre de sauts sur la charge de travail

À la suite de cette étude, une autre équipe dirigée par Sloet van Oldruitenborgh (2006) s'est attachée à objectiver l'effet des sauts sur la charge de travail. Il est en effet commun de penser que les séances de type dressage sont beaucoup moins éprouvantes que les séances de type enchaînement d'obstacles. Cela dépend-t-il du nombre de sauts, de la hauteur des sauts, du rapprochement des sauts? Quel est le supplément de charge de travail lié au saut d'obstacle par rapport à une séance de plat dans les mêmes conditions?

Pour ce faire, cette équipe a comparé la FC et la lactatémie de 7 chevaux d'école sur un parcours de 12 obstacles (de 0,8 à 1m) ou sur le même parcours sans barres, à la même

vitesse de galop. On constate une augmentation significative des paramètres biologiques entre les deux tests : la FC est multipliée par 1,15 et la lactatémie par 3,5 dans le parcours avec sauts. Ces paramètres se sont encore révélés être cohérents et fiables pour montrer que la présence de sauts enchainés augmentait significativement la charge de travail chez le cheval de CSO.

4.2.3 Qualité du sol, terrain, charge de travail

Les études de la vitesse maximale des chevaux de course selon la nature du terrain, en lien avec le port de fers ou non, sont très nombreuses. Cette variable influe également directement la charge de travail.

Sloet van Oldruitenborgh *et al.* (1991) ont soumis des chevaux de voltige sans voltigeur à un test standardisé sur un sol de bonne qualité puis sur un sol en sable profond en bord de mer. La charge de travail était significativement plus importante sur le sol profond. Qui plus est, le même test sur sol normal mais en présence de voltigeur ne donnait pas de différence significative. La nature du sol est donc plus handicapante dans cette discipline que le poids que représente un voltigeur.

4.2.4 Effet de l'ajout d'une charge

Poids du cavalier *versus* poids mort

On peut se demander si un cavalier, capable de s'adapter aux mouvements du cheval, entraîne des répercussions différentes sur la locomotion par rapport à un poids mort. Certaines études cinématiques de la locomotion du cheval sur tapis roulant ont montré qu'il n'y avait aucune différence significative entre un cavalier et une selle plombée de même poids (Sloet van Oldruitenborgh *et al.*, 1995).

Cependant, pour Clayon *et al.* (1999) ou De Cocq *et al.* (2004), on ne peut assurer que l'ensemble cheval et cavalier se comporte proportionnellement comme un cheval plus lourd. En effet, les chevaux montés ne font pas que porter le poids de la selle et du cavalier ; ils doivent aussi endurer la charge de travail additionnelle qui provient des différentes influences dynamiques (Peham et Schobesberger, 2004). L'effet dynamique du cavalier est concentré dans la dernière partie de la phase d'appui, à un moment où le centre de gravité du cheval a déjà commencé à s'élever.

Effet du cavalier sur la locomotion

D'autres auteurs prouvent au contraire un effet bénéfique du cavalier sur la variabilité du schéma locomoteur, l'hypothèse étant qu'un cavalier expérimenté exercerait un certain effet stabilisant sur la foulée du cheval.

Peham *et al.* (2004) évaluent que les forces verticales sont diminuées de 16 % quand le cheval est monté, mais que les forces horizontales sont augmentées, traduisant une action stabilisatrice exercée par le cavalier dans l'axe vertical, mais déstabilisatrice dans le plan horizontal. Par ailleurs, ils concluent que de façon générale, le schéma locomoteur d'un cheval bien monté varie moins que celui d'un cheval non monté.

De la même façon, Lagarde *et al.* (2005) montrent que la synchronisation étroite entre le cavalier expérimenté et le cheval se traduit par une augmentation dans la régularité temporelle des oscillations du tronc du cheval. Cela est en accord avec le fait que pour certains auteurs, le centre de gravité du cheval n'est pas modifié qu'il soit monté ou pas. Cependant, lors du mouvement, et notamment à grande vitesse, il paraît peu probable que cette concordance des centres de gravité soit conservée.

Effet du cavalier sur la charge de travail

Hoyt et Taylor (1981) ont montré que la vitesse choisie par le cheval est celle qui correspond à un coût de transport minimum. Plusieurs études, étudiant l'effet de l'ajout d'une charge sur le métabolisme et la locomotion du cheval, ont révélé que lorsqu'un poids est ajouté (selle plombée, poids mort attaché...), la vitesse choisie diminue, traduisant une augmentation du coût métabolique de la locomotion. En effet, de façon logique, le fait d'ajouter une charge à l'animal augmente les forces qui doivent être générées par les muscles et accroît donc la dépense métabolique.

Cela se voit notamment à travers les modifications induites sur le schéma locomoteur : un cheval qui transporte un poids (équivalent à 19 % de son poids corporel) augmente le temps de contact de sa foulée de 7,7 %. La phase d'appui étant plus longue, cela confirme la croyance généralisée selon laquelle les chevaux montés diminuent leur phase de suspension (Thornton *et al.*, 1987) même s'il n'existe pas de véritable consensus.

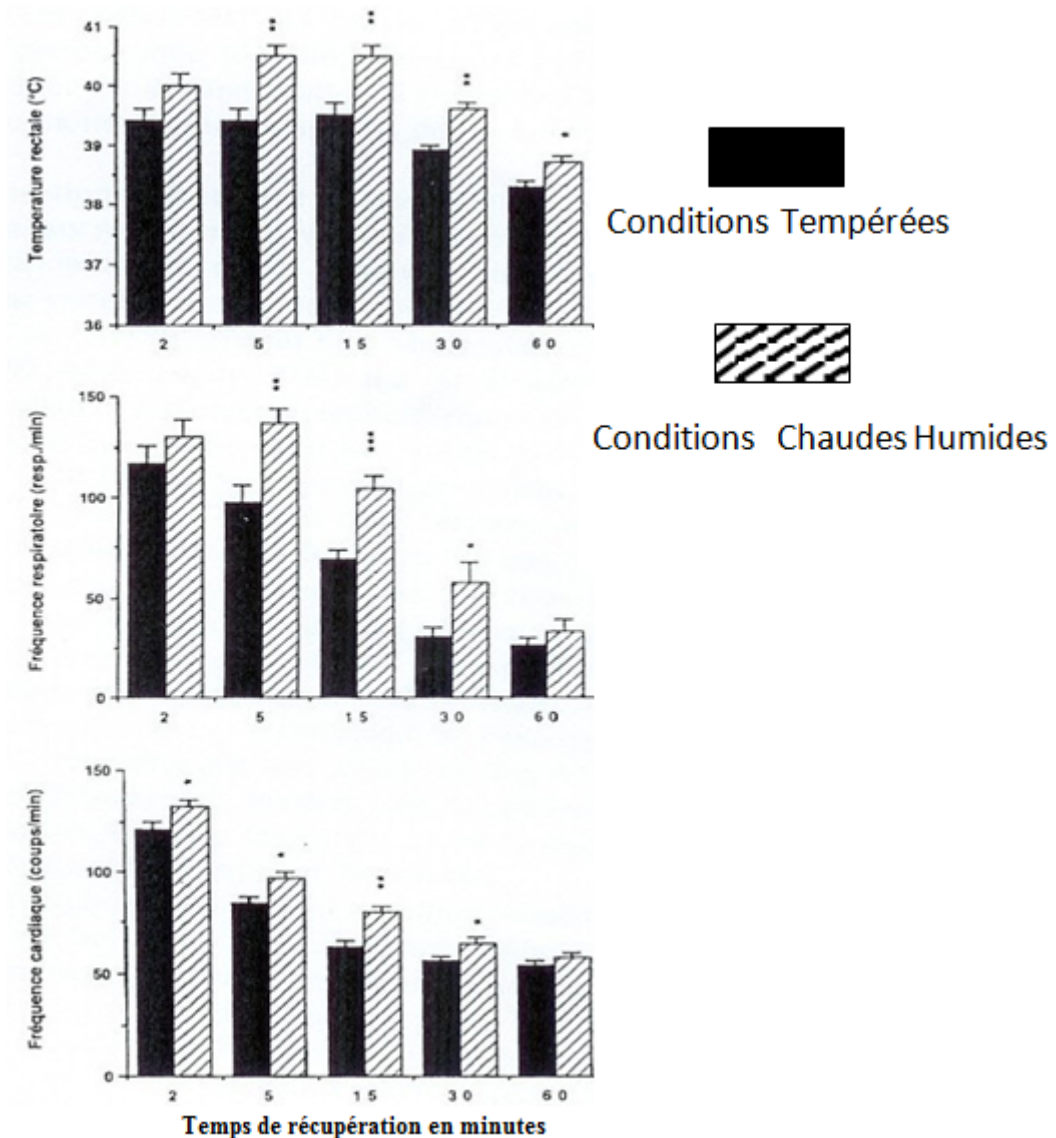
Par ailleurs, l'accroissement de la dépense énergétique en réponse à l'ajout d'une charge a pu être clairement démontré par l'augmentation de la FC, de la ventilation et des concentrations sanguines en lactates chez les chevaux testés (Thornton *et al.*, 1987, Sloet van Oldruitenborgh *et al.*, 1995). Cela est également objectivé par la diminution de la V4 et de la V200 obtenues lorsqu'une charge est ajoutée.

Sloet van Oldruitenborgh *et al.* ne mettent pas cela en évidence dans le cas des chevaux de voltige (1991). La comparaison entre la charge de travail sur cercle de longe ne montrait aucune différence significative entre le cheval nu ou portant un voltigeur. Comme nous l'avons vu précédemment, le travail en sol profond a plus d'impact sur la charge de travail que l'ajout d'une charge.

4.2.5 Effet des conditions climatiques

Les conditions de température et d'humidité dans lesquelles se déroule l'exercice ont un impact considérable sur la physiologie du cheval à l'effort, qu'il convient de prendre en compte lors d'un test standardisé. En 1996, Art *et al.* ont comparé la récupération chez des Trotteurs soumis à un effort standardisé dans des conditions chaudes et humides (T° : 30°C , humidité relative : 75 %) et dans des conditions tempérées (T° : 15°C , humidité relative : 55 %) (Figure 29).

FIGURE 29 – Température rectale, fréquence respiratoire et fréquence cardiaque mesurées chez des Trotteurs à la récupération, après un effort standardisé en conditions chaudes et humides ou en conditions tempérées (Art *et al.*, 1996).



Les chevaux étaient en conditions tempérées avant le test et pendant la période de

récupération. La fréquence cardiaque, la fréquence respiratoire et la température ont été mesurées, dans les deux groupes, 5, 15, 30 et 60 minutes après l'arrêt de l'effort. Les trois paramètres retournaient à leur valeur de repos beaucoup plus lentement en conditions chaudes et humides par rapport aux tempérées. Ceci s'explique par les problèmes de sudation, moins efficace quand l'humidité augmente.

De même, Galloux en 1994 insistait sur le fait qu'un travail dans des conditions extrêmes de chaleur comme les Jeux Olympiques d'Atlanta augmentaient nécessairement l'intensité de l'effort d'un minimum de 25 % de $VO_2\text{max}$. Une adaptation progressive était donc indispensable. La sensibilité individuelle est variable mais peut nécessiter une acclimatation Outre-Mer.

4.3 Le capteur *Equisense Motion*

4.3.1 Les enjeux de la recherche et du développement chez Equisense

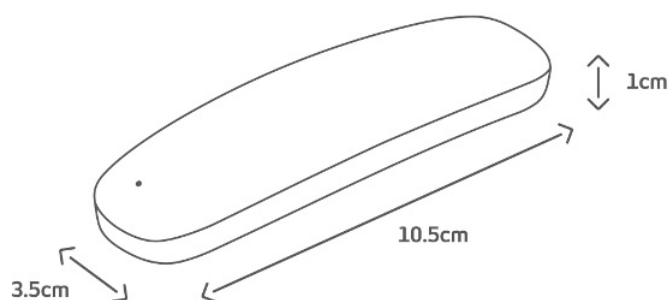
Benoit Blancher, Camille Saute et Idriss Boumaza, 3 ingénieurs passionnés et cavaliers ayant fait leurs armes dans les différentes disciplines, sont convaincus que la technologie est une alliée qui doit être mise au service de la relation cheval-cavalier. L'aventure a commencé en 2014 au centre d'innovation de l'UTC de Compiègne et se poursuit depuis au pôle Euratechnologie de Lille, où l'équipe s'agrandit rapidement. L'entreprise s'adresse aux 2 millions de cavaliers de l'Hexagone (700 000 licenciés d'après "Fédération Française d'Équitation") mais aussi à l'international puisqu'elle compte bien s'imposer comme leader mondial de l'objet connecté pour l'équitation.

Le succès d'une première levée de fonds permet à Equisense de transformer son premier prototype en produit. Le capteur *Equisense Motion* a déjà séduit plus de 1500 utilisateurs, d'après "Equisense-Web". Un deuxième capteur, Equisense Care, dédié plus spécifiquement à la santé des chevaux au repos est en cours de développement car, le marché a beau être de niche, la concurrence est déjà bien réelle : rien qu'en France, deux autres start-up se sont lancées sur le même créneau et d'autres sont attendues.

Arionéo a lancé un capteur pour la surveillance du cheval au box et un second sur la locomotion du cheval de course ; Décathlon propose désormais en partenariat avec Arionéo une couverture connectée. Seaver a produit un protège-sangle connecté pour la locomotion du cheval de sport. Enfin, CWD, un sellier haut de gamme (incluant dans leur équipe de recherche et développement des biomécaniciens équins de l'EnvA) met actuellement au point une selle connectée pour l'obstacle.

D'où la nécessité pour Equisense de faire valoir le capteur *Equisense Motion* à sa juste valeur, notamment en étant scientifiquement très précis (Figure 30). Des tests en interne comme ceux réalisés au cours de cette thèse expérimentale, supervisés par un comité scientifique composé de personnalités de la médecine sportive équine, ont pour objectif de garantir une validité scientifique sérieuse. Philippe Benoit et Emmanuelle Van Erck Westergren sont en effet deux vétérinaires internationaux spécialistes en médecine sportive équine. De plus, de nombreux partenariats se sont concrétisés depuis la création d'Equisense : l'Institut Français du Cheval et de l'Équitation, l'université d'Utrecht, la clinique équine de Grosbois en Seine-et-Marne, et d'autres à venir. Les mises-à-jour se succèdent au fur et à mesure de l'amélioration des algorithmes grâce aux tests internes et aux remarques quotidiennes des utilisateurs.

FIGURE 30 – Visualisation du capteur *Equisense Motion* (d'après "Equisense-Web").



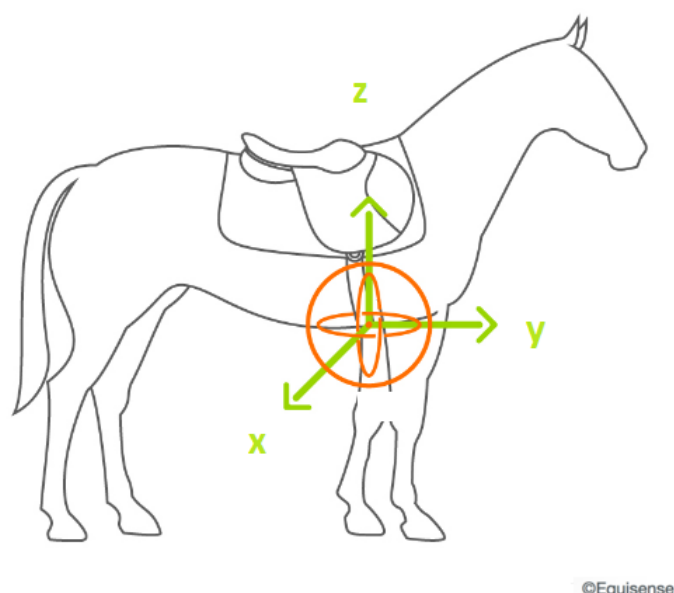
4.3.2 Une technologie centrée sur l'interaction cheval-cavalier

Equisense Motion vise à aider le cavalier à mieux comprendre son cheval en réagissant tôt et de la meilleure façon à ses différentes attitudes, et à le faire progresser tout en respectant le bien-être de sa monture, par l'optimisation de son ressenti et une prise de recul grâce à des mesures objectives. Il est vrai que chaque cavalier reste très sensible

aux sensations éprouvées lors des moments passés à cheval mais les impressions en fin de séance sont parfois faussées.

Le développement ingénieux d'algorithmes permettant de reconstruire la locomotion du cheval donne ainsi l'opportunité au cavalier de suivre et d'analyser de plus près le travail mis en place avec sa monture. La technologie de cette innovation, pesant en tout et pour tout 29 g, comprend trois éléments fondamentaux. Trois types de capteurs complémentaires sont en effet intégrés dans *Equisense Motion*, possédant chacun 3 axes d'analyse du mouvement (Figure 31).

FIGURE 31 – Les axes d'analyse du mouvement utilisés par *Equisense Motion* (d'après "Equisense-Web").



- **L'accéléromètre** mesure l'accélération du cheval afin de déterminer à quelle allure il évolue. Le signal de l'accélération verticale (axe z), sous forme d'oscillations, est reçu toutes les deux secondes et rapporté à un schéma caractéristique d'allure. Cela garantit une validité pour tous types de chevaux malgré la grande variabilité des allures, naturelles et artificielles. Un mode poney a été élaboré car leur galop étant spécifique, le signal de référence était trop différent pour que l'allure soit reconnue comme du galop.
- **Le gyromètre** mesure la vitesse de rotation sur l'axe transversal du cheval (axe x). Cette donnée permet de quantifier le nombre de saut réalisés. Il mesure en effet la bascule du cheval d'avant en arrière, et notamment le soulèvement de l'avant-main du cheval, qui est bien plus élevé lors d'un saut qu'au galop. Ce paramètre est

délicat car un changement de pied sauté peut être détecté comme un saut même s'il n'y pas de barre au sol.

- **Le magnétomètre**, fonctionnant sur le même principe qu'une boussole, détermine l'orientation spatiale des déplacements du cheval par rapport au Nord magnétique (axe y). Il permet ainsi de calculer les temps de travail à main gauche et à main droite. La mesure est corrélée aux données des autres capteurs car le magnétomètre peut subir des interférences magnétiques, en présence de piliers métalliques par exemple.

L'association de ces trois capteurs, notamment l'accélération et la rotation selon les différents axes permet d'analyser la locomotion du cheval au travail via plusieurs indicateurs.

4.3.3 Les fonctionnalités du capteur *Equisense Motion*

À la fin d'une séance avec *Equisense Motion*, le capteur transmet en moins d'une minute les données à l'application mobile adaptée au smartphone de l'utilisateur (IOS ou Android), pour une rétrospective immédiate (Figure 32). Il est possible de séquencer l'acquisition, afin de faire un premier point, notamment après la détente.

FIGURE 32 – Visuels de l'utilisation de l'application mobile *Equisense Motion* (d'après "Equisense-Web").



La mémoire d'application permet l'enregistrement de l'évolution des indicateurs suivants au fil des séances ce qui donne accès au suivi longitudinal de 4 à 6 chevaux avec la même application. Les indicateurs peuvent également être une aide dans le cas de recommandations de travail indiquées par les professionnels du cheval tels que l'entraîneur, le vétérinaire ou l'ostéopathe, dans un cadre de remise progressive au travail par exemple. Les indicateurs fournis sont les suivants, d'après "Equisense-Web".

Le temps passé à chaque allure

La répartition du temps passé à chaque allure est une donnée précieuse bien qu'il n'y ait pas de répartition idéale. Cela dépendra des objectifs de travail et de la condition physique du cheval. Dans le cas d'un déséquilibre accidentel, il sera possible d'ajuster cette distribution lors des séances suivantes et de la contrôler.

Le temps passé à chaque main

L'indicateur de temps passé à chaque main est très important pour apporter au cavalier le recul nécessaire pour être au plus près de l'équilibre recherché entre main droite et main gauche. Il est donné en pourcentage, globalement mais aussi avec le détail pour chaque allure. La musculature harmonieuse du cheval en dépend, notamment dans le cas de travail en cercles serrés au galop ou de séances de longe, par exemple.

Dans le cas du travail d'un cheval plus raide à une main qu'à l'autre, cela serait justifié, en vue de rectifier le problème au mieux mais la plupart du temps le cavalier s'installe inconsciemment à la main à laquelle il est le plus à l'aise. Le confort vient du fait que le cheval et le cavalier soient gauchers ou droitiers mais aussi des problèmes biomécaniques de chacun. En toute connaissance de cause, cela permet finalement aussi au cavalier de ne pas provoquer trop de stress et de fatigue au cheval en insistant trop lourdement sur la main où il serait plus en difficulté.

Le nombre de sauts

Le nombre de sauts désigne très simplement le nombre d'obstacles franchis par le cheval lors de la séance. Cependant, comme expliqué plus haut, le capteur se basant sur toute rotation autour de l'axe transversal du cheval, indépendamment de la présence d'un obstacle, si le cheval fait un saut de mouton, réalise un changement de pied sauté ou saute une flaque d'eau, cela peut être considéré comme un saut.

La cadence

La cadence représente la fréquence des foulées c'est-à-dire le nombre de foulées par minute à une allure donnée. Cela permet de calculer une note de régularité sur 10 qui

indique si la cadence à cette allure a beaucoup varié pendant la séance ou pas. La régularité témoigne du fait que le cheval est bien régulier à chaque allure et qu'il n'a pas tendance à se précipiter ou ralentir. Certains exercices peuvent cependant dégrader les mesures de cet indicateur. En effet, pour toute transition montante ou descendante dans la même allure, la cadence varie et donc la note de régularité diminuent.

Quelques valeurs de référence de cadence chez le cheval selon Patrick Galloux

- Pas : 40 - 60 foulées/min ;
- Trot : 55 - 90 foulées/min ;
- Galop : 80 - 120 foulées/min.

Le rebond

Le rebond représente le déplacement vertical (en cm) du corps du cheval à chaque foulée. Il correspond donc aux sensations de mouvement vers le haut pour le cavalier en selle. Suivre son évolution peut donner beaucoup d'informations sur la santé locomotrice du cheval et sur l'évolution de ses performances.

Le rebond est directement affecté par les dorsalgies. Ainsi, après un traitement de douleurs par infiltrations, mésothérapie ou ostéopathie, il peut être intéressant de suivre la réapparition progressive du rebond. De plus, ce paramètre répond bien à certains exercices et il est donc possible de suivre la progression d'un cheval dans ce sens. Un jeune cheval est même capable de doubler ses valeurs de rebond dans les premières années de travail.

Quelques valeurs de référence de rebond chez le cheval selon Patrick Galloux :

- Pas : 1 - 5 cm ;
- Trot : 7 - 16 cm ;
- Galop : 15 - 30 cm.

La symétrie

La symétrie de l'allure est calculée au trot et en ligne droite par comparaison de deux demi-foulées. Elle atteste d'un fonctionnement symétrique des deux diagonaux au trot. Si un des membres est fragilisé, le cheval le soulagera et très vite les deux demi-foulées ne seront pas identiques. Le suivi de cet indicateur à la semaine ou au mois permet de contrôler la qualité de la locomotion du cheval pour détecter au plus tôt les anomalies d'allures et anticiper les boiteries. Les dissymétries postérieures peuvent cependant être sous estimées du fait de la présence du capteur plus près des antérieurs.

Fonctionnalités à venir

Dans un second temps, *Equisense Motion* vise de nouveaux indicateurs tels que la vitesse, le tracé du parcours à l'aide du GPS du téléphone et la charge de travail sous forme d'une jauge (Figure 33). L'application proposera également des programmes d'exercices ciblés, un calendrier pour être à jour dans les visites vétérinaires ou toutes autres échéances, mais aussi une option de partage des séances pour informer objectivement et précisément les autres intervenants concernés par le cheval suivi (propriétaire, demi-pensionnaire, entraîneur ou vétérinaire...).

FIGURE 33 – Les indicateurs effectifs et à venir du capteur *Equisense Motion* (d'après "Equisense-Web").



La symétrie



Le temps passé à chaque main et à chaque allure



Le rebond



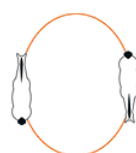
La cadence



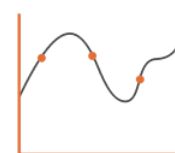
Le nombre de sauts



La vitesse



Le tracé



L'intensité du travail

©Equisense

4.4 Un objectif innovant : fournir une note de charge de travail pour chaque séance

Comme nous l'avons vu précédemment, que l'on soit cavalier amateur, professionnel ou entraîneur, savoir mesurer avec précision l'intensité du travail lors des séances n'est pas une mince affaire. Nous sommes souvent biaisés par notre propre ressenti sans forcément avoir conscience de ce nous avons vraiment fait réaliser à notre monture.

Pourtant, mesurer et tenir compte de la charge de travail imposée au cheval est primordial pour que l'entraînement soit efficace sans mener à des contre-performances voire à des dommages physiques comme des myosites, tendinites, fractures et autres atteintes liées au surentrainement. Le surpoids peut également être évité en visant une meilleure adéquation de l'alimentation par rapport à une activité que l'on peut quantifier précisément.

Equisense estime donc qu'il est indispensable d'intégrer la charge de travail à l'outil de gestion du cheval au travail qu'est le capteur *Equisense Motion*. Mais sur quels paramètres fonder un algorithme de "jauge de charge de travail" ? Peut-on s'affranchir de la mesure directe des paramètres physiologiques et se contenter de données indirectes ? Sachant que le capteur donne accès au temps passé à chaque allure, au nombre de sauts, de transitions, au rebond et à la cadence, y aurait-il corrélation entre une note calculée indirectement via les données biomécaniques mesurées par le capteur et les méthodes invasives habituelles d'évaluation de l'intensité de l'effort (FC et lactatémie), pour un exercice donné ? Dans quelle mesure ? Cette analyse innovante pourrait-elle être assez fiable pour se substituer à la première, dans un contexte de suivi du cheval sain ? L'enjeu est de taille. Le capteur *Equisense Motion* est ainsi au coeur de notre étude expérimentale, dans le but de déterminer quel rôle cette nouvelle technologie peut jouer dans l'analyse de la charge de travail, aujourd'hui mais aussi dans le futur.

DEUXIÈME PARTIE

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

5. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les paramètres biomécaniques mesurables par le capteur tels que le rebond et la cadence moyens, associés aux caractéristiques physiques de la séance d'entraînement, peuvent-ils refléter la charge de travail aussi efficacement que les paramètres physiologiques mesurés en routine lors des tests à l'effort ?

Dans le cadre de cette recherche, nous avons tenté de mettre en place des conditions de travail induisant un effort intense (par opposition à un effort faible). L'effet des conditions expérimentales sur des paramètres physiologiques connus pour être liés à l'effort a été mesuré afin de valider notre protocole d'effort. Dans le même temps, nous avons mesuré les paramètres biomécaniques enregistrés par le système *Equisense Motion* afin de vérifier s'ils pouvaient être utilisés comme indicateurs de l'intensité de l'effort réalisé par le cheval au cours de la séance de travail.

5.1 Effort faible *versus* effort intense

5.1.1 Choix parmi les paramètres ayant un impact sur la charge de travail

Quels paramètres mesurables par *Equisense Motion* étaient pertinents pour faire varier la charge de travail ? Pour rappel, la charge de travail était influencée par des facteurs de performance multiples (Barrey, 1994) :

- **extrinsèques** comme les conditions météorologiques, les qualités mécaniques de la piste, le rationnement alimentaire ou la technique du cavalier ;
- **intrinsèques** au cheval, c'est-à-dire influencés par l'entraînement, comme les caractéristiques physiologiques, énergétiques et biomécaniques.

Une enquête a été réalisée par l'équipe d'Equisense auprès de 10 personnes pratiquant l'équitation afin d'identifier les paramètres qu'ils estimaient avoir un impact sur l'intensité de l'effort lors d'une séance de travail (Tableau 14).

TABLEAU 14 – Recensement des paramètres susceptibles d’influencer la charge de travail pour l’équipe d’Equisense.

| Paramètres | Biomécaniques | Physiologiques | Environnementaux |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Liste non exhaustive | Vitesse moyenne Durée de la séance Cadence et rebond Nombre et hauteur des sauts Rapprochement des sauts Main selon latéralité du cheval Changements de pied Déplacements latéraux Transitions | Poids du cheval Poids du cavalier Âge du cheval | Température extérieure Humidité ambiante Qualité des sols |

Nous avons choisi d’utiliser les transitions entre allures afin de créer des conditions différentes d’effort entre nos 2 protocoles explorés. Ce paramètre est facilement quantifiable avec le système *Equisense Motion* et les transitions font partie intégrante de tout travail monté, quelle que soit la discipline et le niveau du cheval. De plus, la plupart des cavaliers n’ont pas une conscience précise du nombre de transitions qu’ils réalisent au cours d’une séance.

5.1.2 Effet supposé des transitions sur la charge de travail

Très peu de littérature est disponible à ce sujet mais il est communément accepté que les transitions entre allures, notamment vers une allure plus élevée, demandent un effort au cheval car elles font intervenir la chaîne musculaire abdominale et mobilisent les postérieurs. Cela constituait notre hypothèse de départ.

Hypothèse :

Plus le nombre de transitions entre allures augmente, plus la charge de travail de la séance augmente.

Il aurait aussi été possible d’augmenter la durée du travail ou sa vitesse moyenne mais cela n’aurait alors plus été représentatif d’une séance standard d’entraînement, condition d’utilisation principale du capteur *Equisense Motion*.

Les transitions dans l'allure n'ont pas été utilisées car les notions d'allure rassemblée, moyenne et allongée laissaient beaucoup de place à la subjectivité du cavalier ou d'un observateur. Leur standardisation en vue d'un protocole expérimental était donc trop délicate.

5.2 Le protocole

Nous avons mis au point deux séances minutées, l'une contenant peu de transitions (effort supposé faible) et l'autre un nombre graduellement plus important de transitions (effort supposé intense). Nous avons pris en compte les transitions montantes et descendantes suivantes : pas-trot, trot-galop et galop-pas. Le pas, le trot et le galop demandés étaient les allures moyennes naturelles du cheval au travail, par opposition au rassemblement et à l'allongement des foulées.

Au cours de ces séances, nous avons mesuré les données physiologiques témoins de l'effort d'une part (FC et lactatémie), et les données biomécaniques recueillies par Equisense Motion (cadence et rebond) d'autre part. Afin d'explorer les effets de l'entraînement sur ces paramètres nous avons travaillé avec deux groupes de chevaux distincts, de haut niveau et de loisir (Figure 34).

FIGURE 34 – Cheval de loisir équipé pour le protocole test (source : Aglaé Jambart).



5.3 Les chevaux

Les chevaux étaient âgés de 5 à 22 ans, pesant entre 350 et 650kg et de note d'état corporel comprise entre 2,5 et 4 sur 5. Le niveau d'entraînement était comparable au sein de chaque lot. Ce niveau était suffisant pour permettre un travail précis dans le calme et donc un déroulement répétable du protocole. Chaque cheval a été testé pendant les 2 séances (effort supposé faible et effort supposé élevé).

Un examen clinique général préalable a permis de s'assurer que les chevaux étaient dans de bonnes conditions pour participer à l'étude. Un ECG au repos a été réalisé au box, au moment d'équiper le cheval. Un cheval de type cob a ainsi été retiré du protocole, du fait d'une condition physique inférieure. Des antécédents de crises de bronchospasme récentes avaient été rapportés et s'ajoutaient à du surpoids.

Les cavaliers étaient de niveau équivalent dans les 2 groupes et un même cheval gardait son cavalier habituel pour les 2 tests afin d'éviter un biais lié au niveau technique du cavalier. Tous les chevaux ont été montés avec leur matériel habituel (Tableau 15).

5.3.1 Chevaux de sport

Nous avons travaillé avec cinq chevaux d'Alexis Borrin, un cavalier de CSO nordiste possédant 25 de chevaux de selle de haut niveau basé aux écuries Magne, à Verlinghem (59). Ces chevaux de 5 à 12 ans, en très bon état général, vivaient au box et étaient travaillés quotidiennement sur le plat et à l'obstacle, en général 45 minutes précédées de 5 à 10 minutes de longe chaque jour.

5.3.2 Chevaux de loisirs

Cinq chevaux de propriétaires ont été sélectionnés au sein d'un même centre équestre, les écuries de la Posterie à Bourghelles (59) pour constituer un groupe d'individus avec un niveau d'entraînement moindre. Tous les cinq, âgés de 11 à 22 ans, avaient une activité régulière, polyvalente, bien que beaucoup moins intense que celle des chevaux de sport : ils étaient travaillés montés ou en main de 2 à 5 fois par semaine et vivaient au pré en groupe.

TABLEAU 15 – Présentation des effectifs recrutés.

NEC : note d'état corporel des chevaux, de 0 (rachitisme) à 5 (obésité) ; Âge en années.

| Cheval (Cavalier) | Âge | Sexe | Race | NEC | Sport/Loisir | 1 ^{ère} séance |
|----------------------|-----|--------|------------------|-----|--------------|-------------------------|
| CAMELIA (Marie) | 5 | Jument | Selle Français | 3 | SPORT | Contrôle |
| BEST OF (Marie) | 6 | Hongre | Selle Français | 3 | SPORT | Test |
| GWLADYS (Marie) | 6 | Jument | Selle Français | 3 | SPORT | Contrôle |
| AMBRE (Marie) | 7 | Jument | Selle Français | 3 | SPORT | Test |
| QUARTA (Marie) | 12 | Jument | Anglo-arabe | 2.5 | SPORT | Contrôle |
| REVEUSE (Lucie) | 12 | Jument | Selle Français | 4 | LOISIR | Contrôle |
| NORTHERN (Marion) | 17 | Hongre | Pur Sang Anglais | 3 | LOISIR | Test |
| HERCULE (Aglaé) | 22 | Hongre | Trotteur | 2.5 | LOISIR | Contrôle |
| HARDI (Aglaé) | 22 | Hongre | New Forest | 3 | LOISIR | Test |

5.4 Conditions d'expérimentation

5.4.1 Terrains

Le protocole s'est déroulé dans le lieu de travail familial des chevaux, pour plus de calme, à savoir une carrière en sable partiellement couverte pour les chevaux de sport (Figure 35) et un manège en sable pour les chevaux de loisir (Figure 36).

FIGURE 35 – La carrière utilisée lors du protocole avec les chevaux de sport (source : Victoire Moucheboeuf).



FIGURE 36 – Le manège utilisé lors du protocole avec les chevaux de loisirs (source : Victoire Moucheboeuf).



Un accès à une zone couverte permettrait de ne pas dépendre des conditions climatiques si le temps était défavorable.

5.4.2 Conditions météorologiques

Les deux protocoles ont été réalisés de façon rapprochée pour éviter que des conditions climatiques différentes biaisent les résultats. Ainsi, les deux groupes étaient testés la même semaine, début juin 2017, à chaque fois sur deux jours consécutifs. Pour les chevaux de sport, le temps était ensoleillé avec des températures de 23 à 25°C, tandis que pour les chevaux de loisirs, elles étaient comprises entre 20 et 23°C, et il y avait plus de vent.

5.5 Déroulement des protocoles

5.5.1 Détail du protocole contrôle et du protocole test

Tous les chevaux étaient équipés au box du capteur *Equisense Motion* fixé à la sangle, pour l'analyse de la locomotion, et de l'électrocardiographe Télévet (KRUUSE), pour l'analyse de la FC pendant toute la durée des tests.

Chaque cheval était testé une demi-heure 2 fois, sur 2 jours consécutifs (Tableau 16). Le temps passé à chaque allure était le même dans le protocole contrôle et le protocole test, soit au total 9 minutes de pas, 9 minutes de trot et 9 minutes de galop.

Le protocole contrôle :

Comportait 3 séquences, appelées ci-après paliers, de 9 minutes (3 minutes de pas suivies de 3 minutes de trot puis 3 minutes de galop) pour un total de 9 transitions.

Le protocole test :

Comportait également 3 paliers de 9 minutes mais chacun comptait un nombre de transitions toujours plus élevé, pour un total de 42 transitions.

- le premier comptait 6 transitions (une transition toutes les 90 s) ;
- le deuxième, 12 transitions (une transition toutes les 45 s) ;
- le troisième, 24 transitions (une transition toutes les 22 s).

Lors des tests, les cavaliers à cheval recevait les instructions via un enregistrement audio, ce qui était plus précis et leur permet d'évoluer librement dans tout l'espace et non pas juste à portée de voix. Pour le protocole contrôle, les transitions étant beaucoup plus espacées, celles-ci étaient directement dictées au cavalier par un opérateur muni d'un

chronomètre. Les moments des prises de sang pour mesurer la lactatémie (analyseur portable Accutrend Lactate du laboratoire ROCHE) étaient également notifiés précisément par audio ou par oral, à l'issue de chacun des 3 paliers (LACTATES dans le tableau 16).

TABLEAU 16 – Récapitulatif des protocoles test et contrôle : comparaison du nombre de répétitions des séquences pas-trot-galop et du nombre de transitions.

| Paliers | Allure | PROTOCOLE CONTROLE | | | PROTOCOLE TEST | | |
|----------------------------------|--------|------------------------------------|-------------|----------------------------------|------------------------------------|-------------|-----------------------|
| | | Durée | Répétitions | Nombre de transitions | Durée | Répétitions | Nombre de transitions |
| Palier 1 | pas | 3 min | 1 fois | 3 | 90 s | 2 fois | 6 |
| | trot | 3 min | | | 90 s | | |
| | galop | 3 min | | | 90 s | | |
| 9 ^{ème} min : LACTATES | | | | 9 ^{ème} min : LACTATES | | | |
| Palier 2 | pas | 3 min | 1 fois | 3 | 45 s | 4 fois | 12 |
| | trot | 3 min | | | 45 s | | |
| | galop | 3 min | | | 45 s | | |
| 18 ^{ème} min : LACTATES | | | | 18 ^{ème} min : LACTATES | | | |
| Palier 3 | pas | 3 min | 1 fois | 3 | 22 s | 8 fois | 24 |
| | trot | 3 min | | | 22 s | | |
| | galop | 3 min | | | 22 s | | |
| 27 ^{ème} min : LACTATES | | | | 27 ^{ème} min : LACTATES | | | |
| Total | - | 28 min (avec les 3 prises de sang) | | 9 | 28 min (avec les 3 prises de sang) | | 42 |

5.5.2 Randomisation

Pour limiter l'intervention d'un effet de la fatigue, les protocoles étaient randomisés : la moitié des chevaux ont commencé par le protocole contrôle et ont fini par le protocole test et vice-versa (Tableau 15). Les effectifs étant impairs, nous avons choisi arbitrairement que 3 chevaux de sport commençaient par le protocole contrôle et que 3 chevaux de loisirs commençaient par le protocole test. Un des chevaux devant commencer par le protocole test ayant été retiré du protocole, sur l'effectif total, 5 chevaux débutaient par le protocole contrôle et 4 par le protocole test.

5.6 Méthode de mesure des paramètres physiologiques

5.6.1 Fréquence cardiaque

L'électrocardiographe embarqué Télévet 100

Le holter Télévet 100 de la marque KRUUSE a été utilisé pour l'acquisition en continu de l'électrocardiogramme pendant l'effort. L'analyse de ces signaux a fourni une donnée fiable de FC en fonction du temps. Les mesures étaient stockées sur une carte SD située

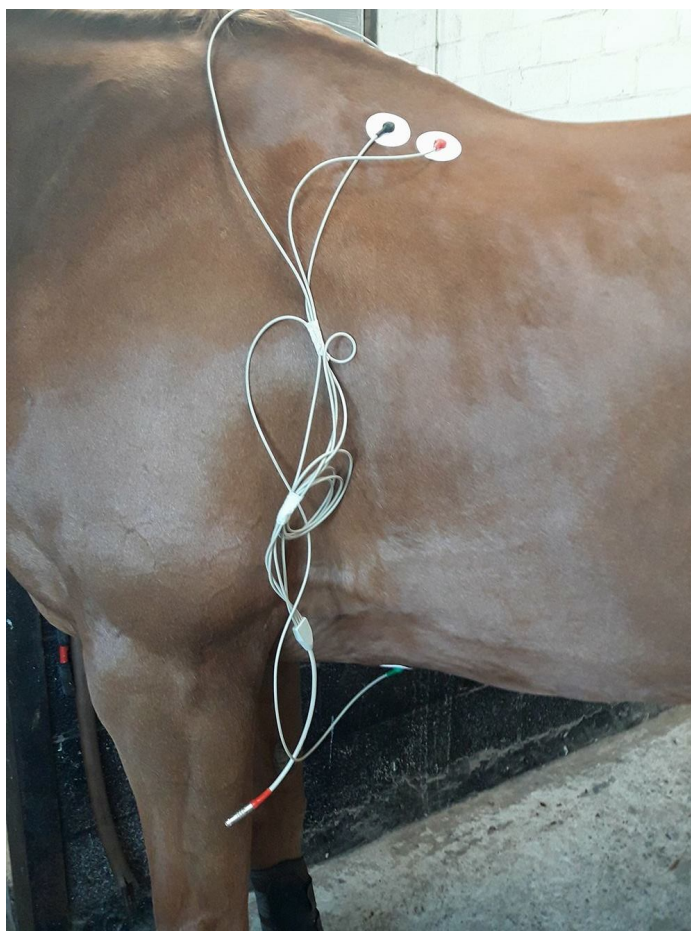
dans le boîtier. L'électrocardiogramme était visualisable sur un ordinateur portable, tablette ou smartphone, en temps réel, grâce à une connexion Bluetooth d'une portée de 100 mètres. Cela permettait de s'assurer de la qualité de l'acquisition à tout moment, et d'intervenir le cas échéant, si une électrode se désolidarisait par exemple.

Mise en place

Après un pansage efficace (pour un meilleur contact) et avant le harnachement, 4 électrodes en mousse à usage unique étaient collées sur le poil du cheval selon les règles suivantes (Figure 37) :

- **La noire** (crâniale) et **la rouge** (caudale) étaient placées sur le côté gauche du garrot, à un travers de main du sommet des processus épineux ;
- **La jaune** était placée en regard de la noire mais du côté droit ;
- **La verte** était placée à gauche au niveau du passage de sangle, soit deux travers de main derrière la pointe du coude gauche.

FIGURE 37 – Placement des électrodes du Télévet 100 (KRUUSE) sur cheval nu (source : Victoire Moucheboeuf).



Ensuite, la selle était mise en place comme de coutume, en prenant seulement soin de ne pas décoller les électrodes. Le boîtier du Télévet était accroché au pommeau dans une housse prévue à cet effet. Par ailleurs, le capteur *Equisense* Motion était fixé sur la sangle grâce à une attache en cuir ajustée pour qu'il soit ventral, dans le plan sagittal du cheval. La figure 38 présente un cheval équipé, prêt à être monté pour réaliser le protocole test ou contrôle. L'utilisation du montoir, préférable en routine pour préserver le dos du cheval, était ici indispensable pour ne pas déplacer les électrodes sous la selle avant même de commencer.

FIGURE 38 – Le Télévet 100 (KRUUSE) mis en place sur cheval sellé (source : Victoire Moucheboeuf).



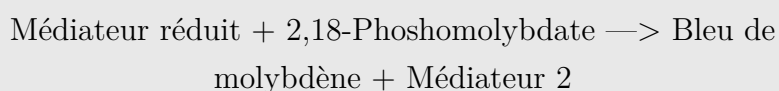
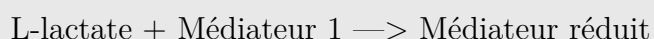
L'électrocardiogramme était enregistré dès que le câble commun aux 4 électrodes était connecté au boîtier, et ce jusqu'à sa déconnexion manuelle.

5.6.2 Lactatémie

L'analyseur portable Accutrend Lactate

La mesure de la lactatémie, six fois par cheval, a été réalisée immédiatement par l'analyseur portable Accutrend Lactate du laboratoire ROCHE. Il s'agit d'une méthode photométrique fiable, très utilisée sur le terrain. Chaque bandelette-test comporte une zone réactive dont la couleur est modifiée par le contact avec le plasma. En effet, les érythrocytes sont piégés dans un filet protecteur et n'atteignent pas la zone de détection. Le lecteur mesure par réflectométrie (à une longueur d'onde de 657 nm) le changement de couleur induit par la réaction chimique catalysée par l'enzyme lactate-oxydase selon la formule suivante :

Réaction colorimétrique lactate-oxydase/méiateur :



Cette quantification est ensuite convertie en concentration de lactates sanguins en mmol/l. L'intervalle de mesure annoncé par l'analyseur est de 0,8 à 26 mmol/l dans des conditions d'utilisation comprises entre 2 et 30°C. En dessous de 0,8 mmol/l, l'écran affichait "LOW".

Réalisation de la mesure de lactatémie

À la fin de chaque palier, une prise de sang d'un volume d'environ 0.3 ml de sang veineux était réalisée à la veine jugulaire droite, avec une aiguille orange (25 G), le plus rapidement possible après que le cheval se soit présenté à l'arrêt. La manœuvre durait une vingtaine de secondes en moyenne, selon la coopération des individus (30 secondes maximum). Ce temps comprenait une désinfection locale à l'alcool à 70°C.

Une bandelette de chimie sèche BM-Lactate pour Accutrend (laboratoire ROCHE) était insérée dans l'analyseur juste après la prise de sang, et un bip sonore signalait que le capot pouvait être ouvert pour déposer une goutte de sang sur la zone réactive (Figure 39). Dès la fermeture du capot, un décompte de 60 secondes se lançait puis la lactatémie s'affichait sur l'écran, directement en mmol/l (Figure 40).

FIGURE 39 – Lactatomètre en cours d'utilisation, avant la fermeture du capot et le décompte (source : Victoire Moucheboeuf).



FIGURE 40 – Lactatomètre affichant la valeur la lactatémie après 60 secondes de lecture (source : Victoire Moucheboeuf).



Les résultats étaient répertoriés sur une fiche manuscrite puis sur un tableur Excel.

5.7 Mesure de deux paramètres biomécaniques

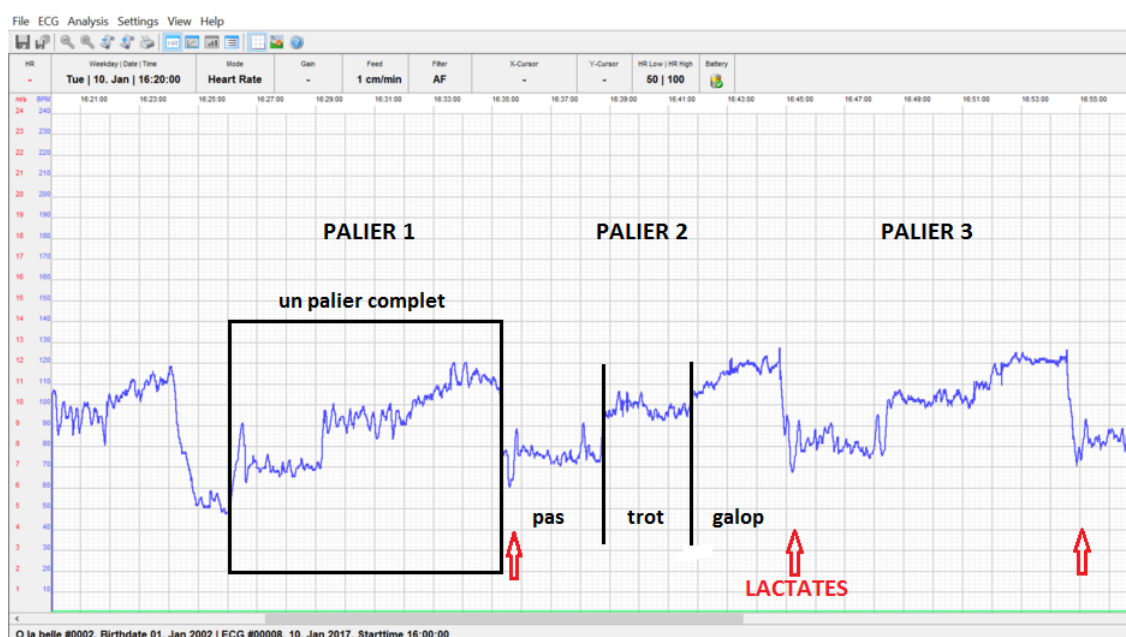
Le capteur *Equisense Motion*, placé sur la sangle au moment où le cheval était sellé, était mis en route au début de la séance (cf infra, Figure 38). À chaque allure, le rebond en cm et la cadence en foulées par minute étaient enregistrés pour chaque cheval, lors des protocoles test et contrôle.

5.8 Traitement des données

5.8.1 La fréquence cardiaque

Le logiciel Télévét fourni avec le holter permettait de traiter facilement les données acquises. L'ECG était directement traduit en FC en fonction du temps. Ces courbes étaient liées à l'allure du cheval au temps t , comme le montre la figure 41 :

FIGURE 41 – La fréquence cardiaque en fonction du temps lors d'un protocole contrôle avec le logiciel Télévét (source : Victoire Moucheboeuf).



Les données étaient ensuite analysées avec le logiciel Matlab, pour extraire les courbes ainsi que les fréquences moyennes et maximales par rapport au repère temporel des paliers. Les plages d'analyse étaient sélectionnées manuellement : les premières secondes d'une plage étaient systématiquement enlevées pour s'affranchir de l'augmentation rapide de la FC suite à un changement d'allure. Pour le cas du protocole test où les temps par allure étaient plus courts et où il y avait plusieurs répétitions à la même allure au sein d'un même palier, les temps passés à la même allure étaient regroupés et analysés groupés.

5.8.2 Lactatémie

Les valeurs de lactatémie répertoriées comme "LOW", c'est-à-dire inférieures à 0,8 mmol/l ont été fixées de façon arbitraire à 0,7 mmol/l pour être prises en compte. Le peu de valeurs à notre disposition nous empêchait de les exclure. D'autres auteurs tels que Van Erck (2013) choisissaient 0,5 mmol/l.

5.8.3 Cadence et rebond

Ces données biomécaniques étaient extraites de la mémoire du capteur et les valeurs moyennes par allure dans chaque condition étaient calculées sur Matlab, de même que les mesures de FC.

5.9 Analyse statistique des données

Une analyse de variance ANOVA tenant compte des effets du "type d'effort" (protocole contrôle *versus* test) et du "type de cheval" (cheval de sport *versus* loisir) a été réalisée sur les paramètres mesurés, physiologiques d'une part et biomécaniques d'autre part, à l'aide du logiciel de statistiques R. L'hypothèse d'une différence vraie de paramètres entre les groupes était associée à un seuil de signification de 0,05. Le seuil de 0,10 qualifiait une tendance.

6. RÉSULTATS

6.1 Paramètres physiologiques

6.1.1 Lactatémie

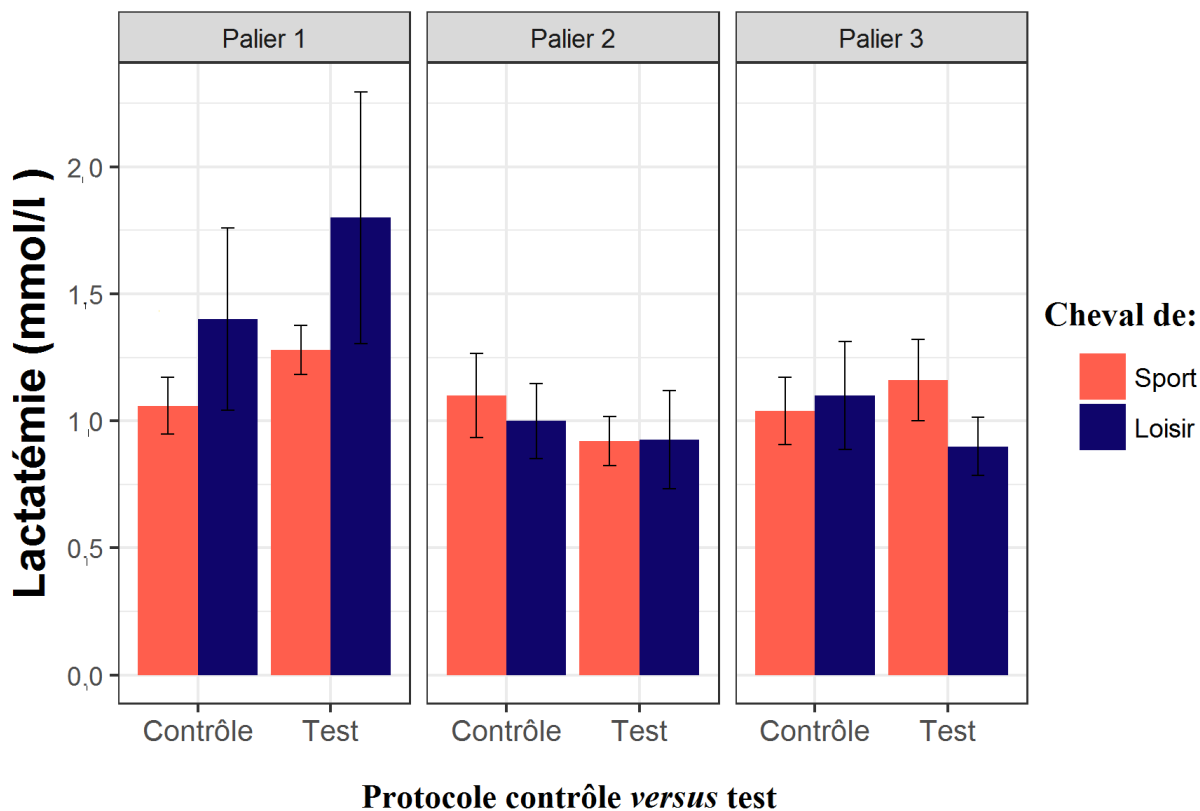
Récapitulatif des résultats

Les moyennes (et écart-types associés) des lactatémies obtenues à chaque palier selon le type d'effort (contrôle ou test) et le type de cheval (sport ou loisir), sont présentées dans le tableau 17. L'ensemble est ensuite récapitulé graphiquement par la figure 42.

TABLEAU 17 – Moyennes et écart-types des lactatémies obtenues à chaque palier, arrondis à la première décimale, en mmol/l.

| Sport/Loisir | Contrôle/Test | Palier | Nombre | Moyenne | Écart-type |
|--------------|---------------|----------|--------|---------|------------|
| Sport | Contrôle | Palier 1 | 5 | 1,1 | 0,3 |
| Sport | Contrôle | Palier 2 | 5 | 1,1 | 0,4 |
| Sport | Contrôle | Palier 3 | 5 | 1,0 | 0,3 |
| Sport | Test | Palier 1 | 5 | 1,3 | 0,2 |
| Sport | Test | Palier 2 | 5 | 0,9 | 0,2 |
| Sport | Test | Palier 3 | 5 | 1,2 | 0,4 |
| Loisir | Contrôle | Palier 1 | 4 | 1,4 | 0,7 |
| Loisir | Contrôle | Palier 2 | 4 | 1,0 | 0,3 |
| Loisir | Contrôle | Palier 3 | 4 | 1,1 | 0,4 |
| Loisir | Test | Palier 1 | 4 | 1,8 | 1,0 |
| Loisir | Test | Palier 2 | 4 | 0,9 | 0,4 |
| Loisir | Test | Palier 3 | 4 | 0,9 | 0,2 |

FIGURE 42 – Lactatémie moyenne à chaque palier en fonction du type de protocole et du type de cheval.



Lactatémie en fonction du type d'effort

Il n'y avait pas de différence significative observée entre les lactatémies associées au protocole contrôle (effort supposé faible) et au protocole test (effort supposé intense). Les moyennes de lactatémie étaient respectivement de 1,12 *versus* 1,17 mmol/l ($p=0,55$).

Lactatémie en fonction du type de cheval

Il n'y avait pas de différence significative observée entre les lactatémies des chevaux de sport et des chevaux de loisir. Les moyennes de lactatémie étaient respectivement de 1,10 *versus* 1,18 mmol/l ($p=0,60$).

6.1.2 Fréquence cardiaque

Deux exemples

Les figures 43 et 44 montrent l'évolution de la FC au cours des paliers du protocole contrôle et test, chez un cheval de loisir et de sport représentatifs de leur groupe.

FIGURE 43 – Fréquence cardiaque en fonction du temps pour le cheval de loisir "NORTHERN" pendant les protocoles contrôle et test.

Courbe épaisse en bleu foncé : protocole contrôle; *Courbe fine en bleu clair* : protocole test; bpm : battements par minute.

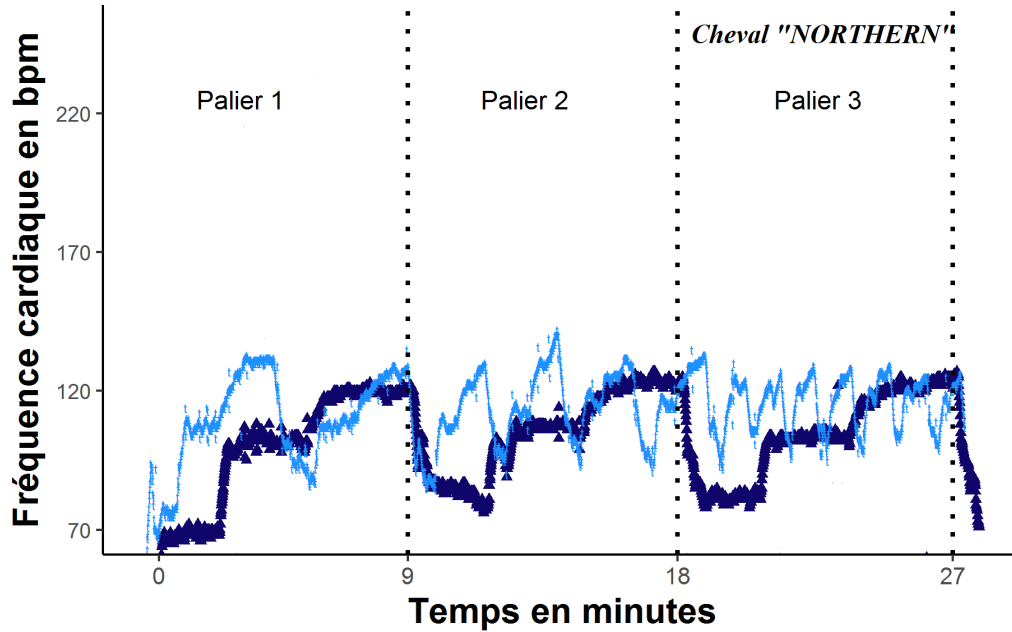
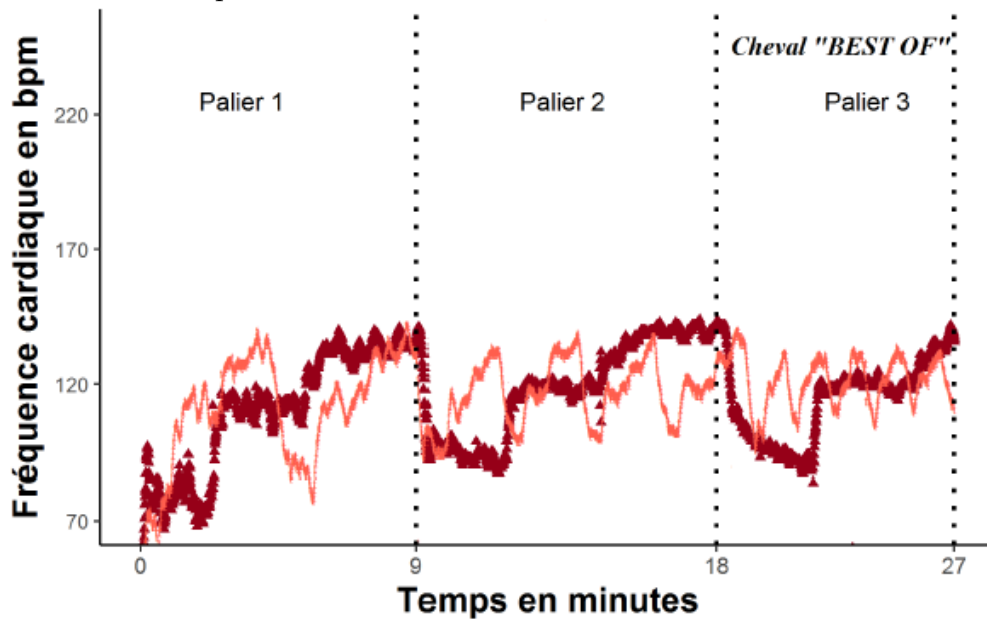


FIGURE 44 – Fréquence cardiaque en fonction du temps pour le cheval de sport "BEST OF" pendant les protocoles contrôle et test.

Courbe épaisse en rouge foncé : protocole contrôle; *Courbe fine en rouge clair* : protocole test; bpm : battements par minute.



Au vu de la forte fluctuation de la FC, notamment lors du protocole test, ce paramètre était étudié dans la suite allure par allure. Nous avons choisi de nous focaliser sur l'effort, soit le trot et le galop, les phases de pas s'apparentant plus à une récupération (diminution de la FC).

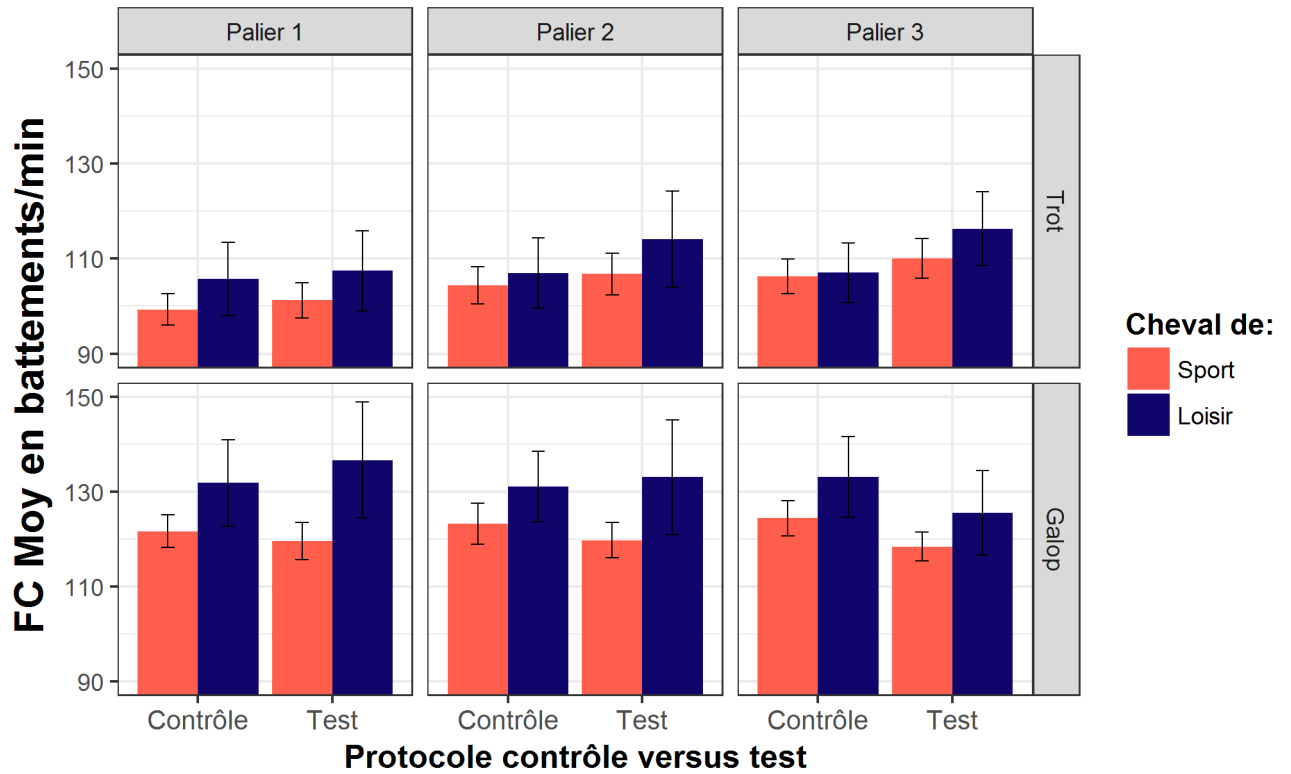
Récapitulatif des résultats

Les moyennes (et écart-types associés) des FC obtenues à chaque palier au trot et au galop selon le type d'effort (contrôle ou test) et le type de cheval (sport ou loisir), sont présentées dans le tableau 18. L'ensemble est ensuite récapitulé graphiquement par la figure 45.

TABLEAU 18 – Moyennes et écart-types des FC obtenues à chaque palier, au trot et au galop, arrondis à la première décimale, en battements par minute.

| Sport/loisir | Contrôle/test | Palier | Allure | Nombre | Moyenne | Écart-type |
|--------------|---------------|----------|--------|--------|---------|------------|
| Sport | Contrôle | Palier 1 | Trot | 5 | 99,3 | 3,3 |
| Sport | Contrôle | Palier 1 | Galop | 5 | 121,7 | 3,4 |
| Sport | Contrôle | Palier 2 | Trot | 5 | 104,4 | 3,9 |
| Sport | Contrôle | Palier 2 | Galop | 5 | 123,3 | 4,3 |
| Sport | Contrôle | Palier 3 | Trot | 5 | 106,3 | 3,6 |
| Sport | Contrôle | Palier 3 | Galop | 5 | 124,4 | 3,6 |
| Sport | Test | Palier 1 | Trot | 5 | 101,3 | 3,7 |
| Sport | Test | Palier 1 | Galop | 5 | 119,6 | 3,9 |
| Sport | Test | Palier 2 | Trot | 5 | 106,7 | 4,3 |
| Sport | Test | Palier 2 | Galop | 5 | 119,8 | 3,7 |
| Sport | Test | Palier 3 | Trot | 5 | 110,0 | 4,2 |
| Sport | Test | Palier 3 | Galop | 5 | 118,4 | 3,1 |
| Loisir | Contrôle | Palier 1 | Trot | 4 | 105,7 | 7,7 |
| Loisir | Contrôle | Palier 1 | Galop | 4 | 131,8 | 9,1 |
| Loisir | Contrôle | Palier 2 | Trot | 4 | 106,9 | 7,5 |
| Loisir | Contrôle | Palier 2 | Galop | 4 | 131,1 | 7,4 |
| Loisir | Contrôle | Palier 3 | Trot | 4 | 107,1 | 6,3 |
| Loisir | Contrôle | Palier 3 | Galop | 4 | 133,1 | 8,5 |
| Loisir | Test | Palier 1 | Trot | 4 | 107,5 | 8,4 |
| Loisir | Test | Palier 1 | Galop | 4 | 136,7 | 12,2 |
| Loisir | Test | Palier 2 | Trot | 4 | 114,1 | 10,2 |
| Loisir | Test | Palier 2 | Galop | 4 | 133,1 | 12,1 |
| Loisir | Test | Palier 3 | Trot | 4 | 116,3 | 7,8 |
| Loisir | Test | Palier 3 | Galop | 4 | 125,5 | 8,9 |

FIGURE 45 – FC moyenne au trot et au galop à chaque palier en fonction du type de protocole et du type de cheval.



FC moyenne en fonction du type d'effort

Il n'y avait pas de différence significative observée entre les FC moyennes associées au protocole contrôle (effort supposé faible) et au protocole test (effort supposé intense), au trot et au galop. Les moyennes de FC étaient respectivement de 104,9 *versus* 109,4 bpm au trot ($p=0,22$) et 128,2 *versus* 125,5 bpm au galop ($p=0,31$).

FC moyenne en fonction du type de cheval

Il n'y avait pas de différence significative observée entre les FC moyennes au trot et au galop entre les chevaux de sport et les chevaux de loisir. Les moyennes de FC étaient respectivement de 104,7 *versus* 109,6 bpm au trot ($p=0,10$) et 121,2 *versus* 132,5 bpm au galop ($p=0,08$).

Il existait donc une tendance telle que la FC moyenne des chevaux de sport était plus basse que celle des chevaux de loisir, indépendamment du type d'effort fourni.

6.2 Paramètres biomécaniques

6.2.1 Cadence

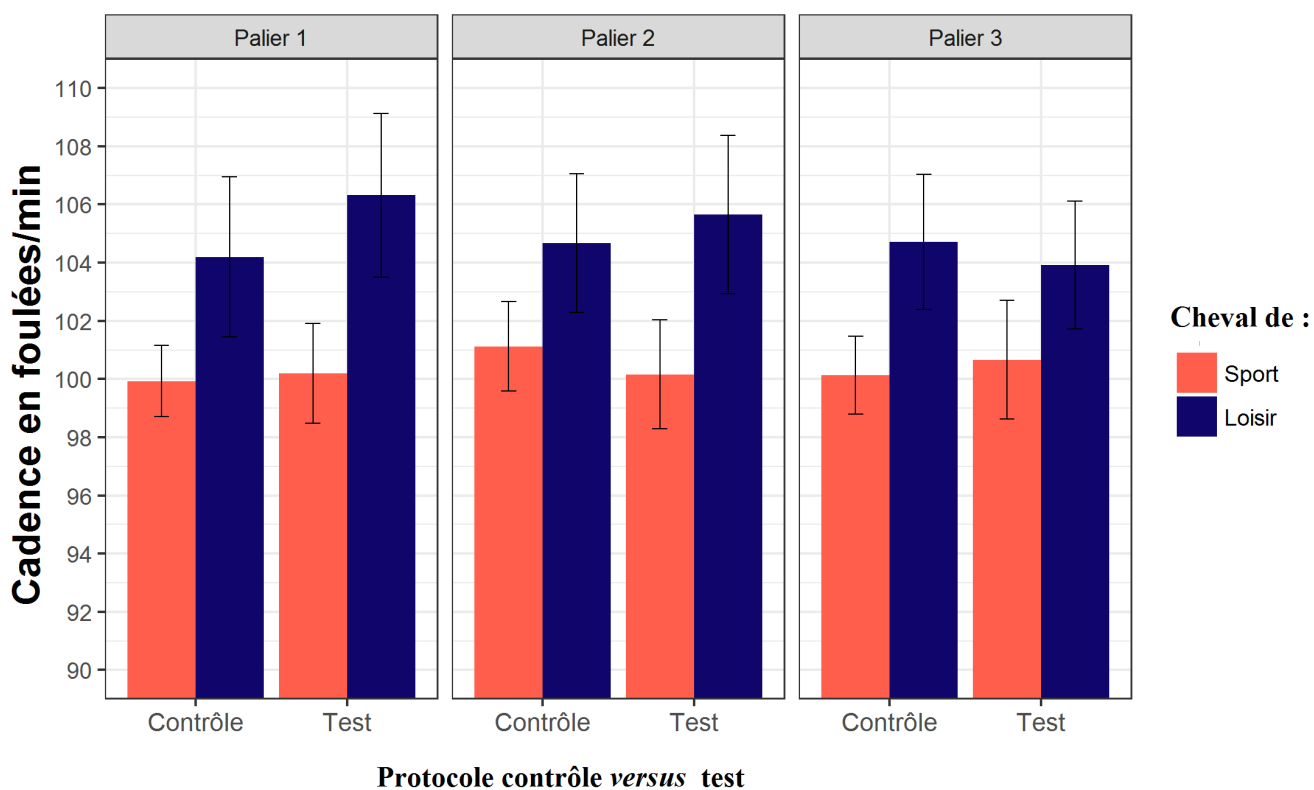
Récapitulatif des résultats

Les données de cadence moyenne et leurs écart-types, pour chaque condition sont présentées au tableau 18. Aucune différence significative n'a été mise en évidence au pas et trot, les valeurs correspondantes ne sont donc pas présentées. La figure 46 récapitule ensuite les résultats de façon graphique. En équitation, il est communément admis qu'une cadence basse est une qualité recherchée chez le cheval de sport : la fréquence des foulées diminue ce qui signifie que leur amplitude augmente, au sein d'une même allure.

TABLEAU 19 – Moyennes et écart-types des cadences obtenues au galop à chaque palier, arrondis à la première décimale (en foulées/min).

| Sport/Loisir | Contrôle/Test | Palier | Nombre | Moyenne | Écart-type |
|---------------------|----------------------|---------------|---------------|----------------|-------------------|
| Sport | Contrôle | Palier 1 | 5 | 99,9 | 2,7 |
| Sport | Contrôle | Palier 2 | 5 | 101,1 | 3,5 |
| Sport | Contrôle | Palier 3 | 5 | 100,1 | 3,0 |
| Sport | Test | Palier 1 | 4 | 100,2 | 3,4 |
| Sport | Test | Palier 2 | 4 | 100,2 | 3,7 |
| Sport | Test | Palier 3 | 4 | 100,7 | 4,1 |
| Loisir | Contrôle | Palier 1 | 4 | 104,2 | 5,5 |
| Loisir | Contrôle | Palier 2 | 4 | 104,7 | 4,8 |
| Loisir | Contrôle | Palier 3 | 4 | 104,7 | 4,6 |
| Loisir | Test | Palier 1 | 4 | 106,3 | 5,6 |
| Loisir | Test | Palier 2 | 4 | 105,7 | 5,4 |
| Loisir | Test | Palier 3 | 4 | 103,9 | 4,4 |

FIGURE 46 – Cadence moyenne au galop à chaque palier en fonction du type de protocole et du type de cheval.



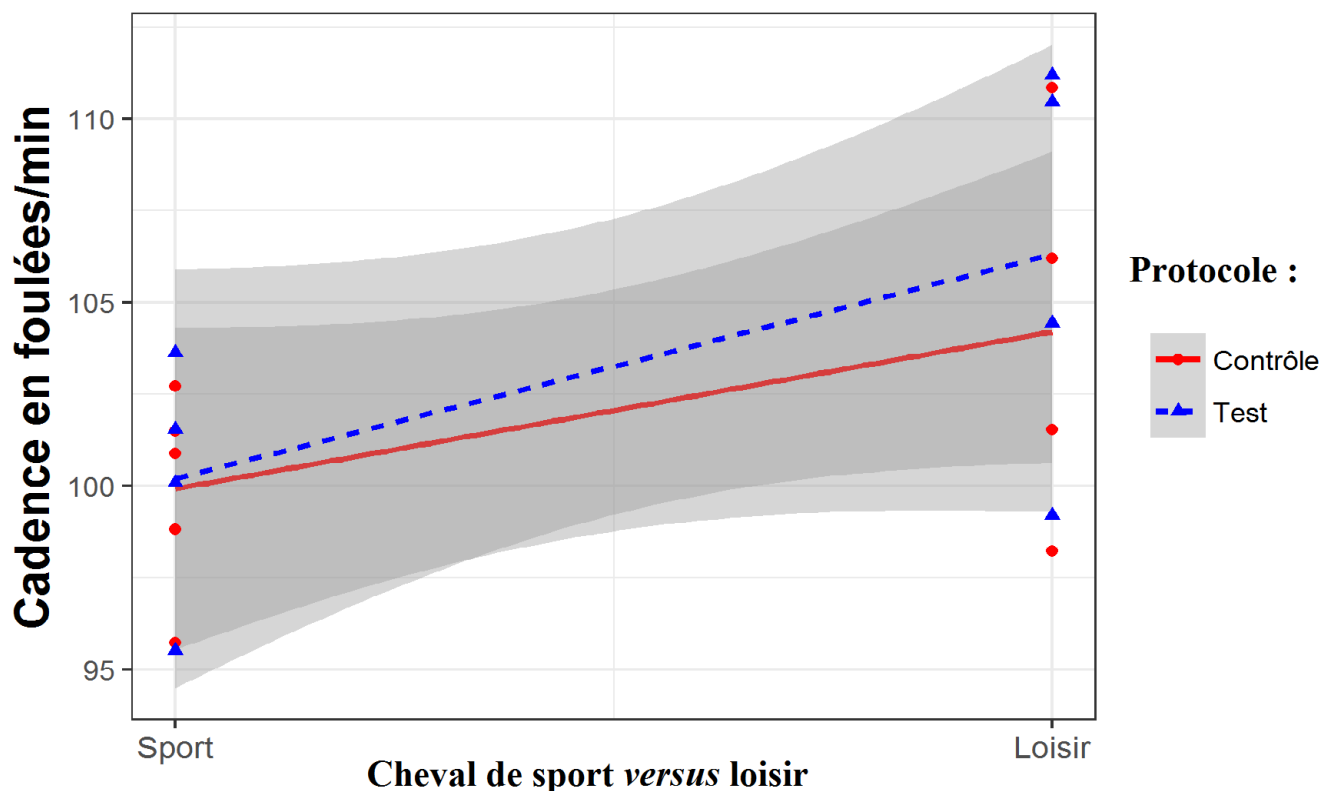
Cadence moyenne en fonction du type d'effort

Nous n'avons pas observé de différence significative de cadence moyenne au galop en fonction de l'effort (protocole contrôle *versus* test). Les moyennes étaient respectivement de 102,5 *versus* 102,8 foulées/min ($p=0,8$).

Cadence moyenne en fonction du type de cheval

La différence entre la cadence moyenne au galop des chevaux de sport et des chevaux de loisir de sport était significative : les moyennes étaient respectivement de 100,4 (sport) *versus* 104,9 (loisir) foulées/min ($p=0,03$). La figure 47 montre l'analyse de variance dans le cas du palier 1.

FIGURE 47 – Analyse de variance de la cadence moyenne au galop au palier 1 en fonction du type de cheval.



Ainsi, les chevaux de sport avaient une cadence moyenne au galop significativement plus basse quel que soit le protocole (contrôle ou test), par rapport aux chevaux de loisir.

6.2.2 Rebond

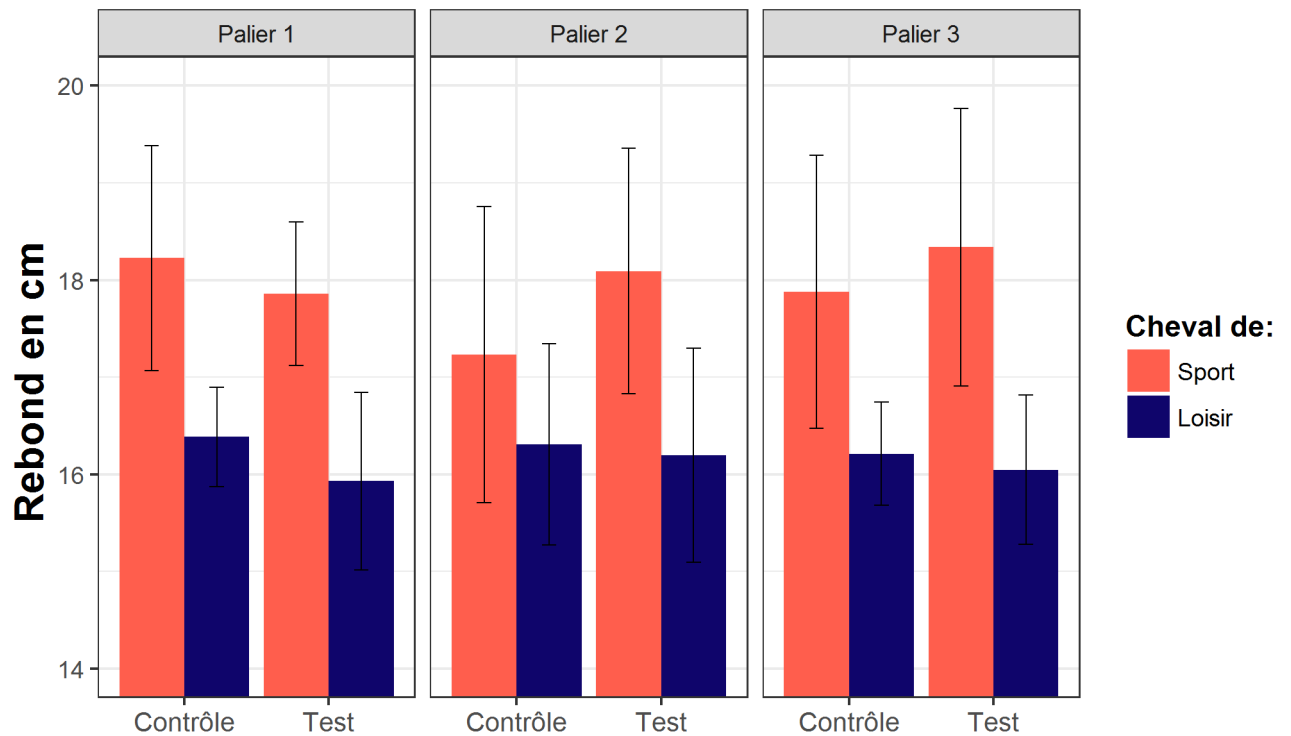
Récapitulatif des résultats

Les données de rebond moyen et leurs écart-types, pour chaque condition sont présentées au tableau 20. De même que pour la cadence, aucune différence significative n'étant observée au pas et trot, seules les valeurs du rebond moyen au galop sont présentées. La figure 48 récapitule ensuite les résultats de façon graphique. En équitation, il est communément admis qu'un fort rebond est une qualité recherchée chez le cheval de sport : l'allure est plus aérienne car à la composante longitudinale du mouvement s'ajoute une composante verticale.

TABLEAU 20 – Moyennes et écart-types des rebonds obtenus au galop à chaque palier, arrondis à la première décimale (en cm).

| Sport/Loisir | Contrôle/Test | Palier | Nombre | Moyenne | Écart-type |
|--------------|---------------|----------|--------|---------|------------|
| Sport | Contrôle | Palier 1 | 5 | 18,2 | 2,6 |
| Sport | Contrôle | Palier 2 | 5 | 17,2 | 3,4 |
| Sport | Contrôle | Palier 3 | 5 | 17,9 | 3,1 |
| Sport | Test | Palier 1 | 4 | 17,9 | 1,5 |
| Sport | Test | Palier 2 | 4 | 18,1 | 2,5 |
| Sport | Test | Palier 3 | 4 | 18,3 | 2,9 |
| Loisir | Contrôle | Palier 1 | 4 | 16,4 | 1,0 |
| Loisir | Contrôle | Palier 2 | 4 | 16,3 | 2,1 |
| Loisir | Contrôle | Palier 3 | 4 | 16,2 | 1,1 |
| Loisir | Test | Palier 1 | 4 | 15,9 | 1,8 |
| Loisir | Test | Palier 2 | 4 | 16,2 | 2,2 |
| Loisir | Test | Palier 3 | 4 | 16,0 | 1,5 |

FIGURE 48 – Rebond moyen au galop à chaque palier en fonction du type de protocole et du type de cheval.



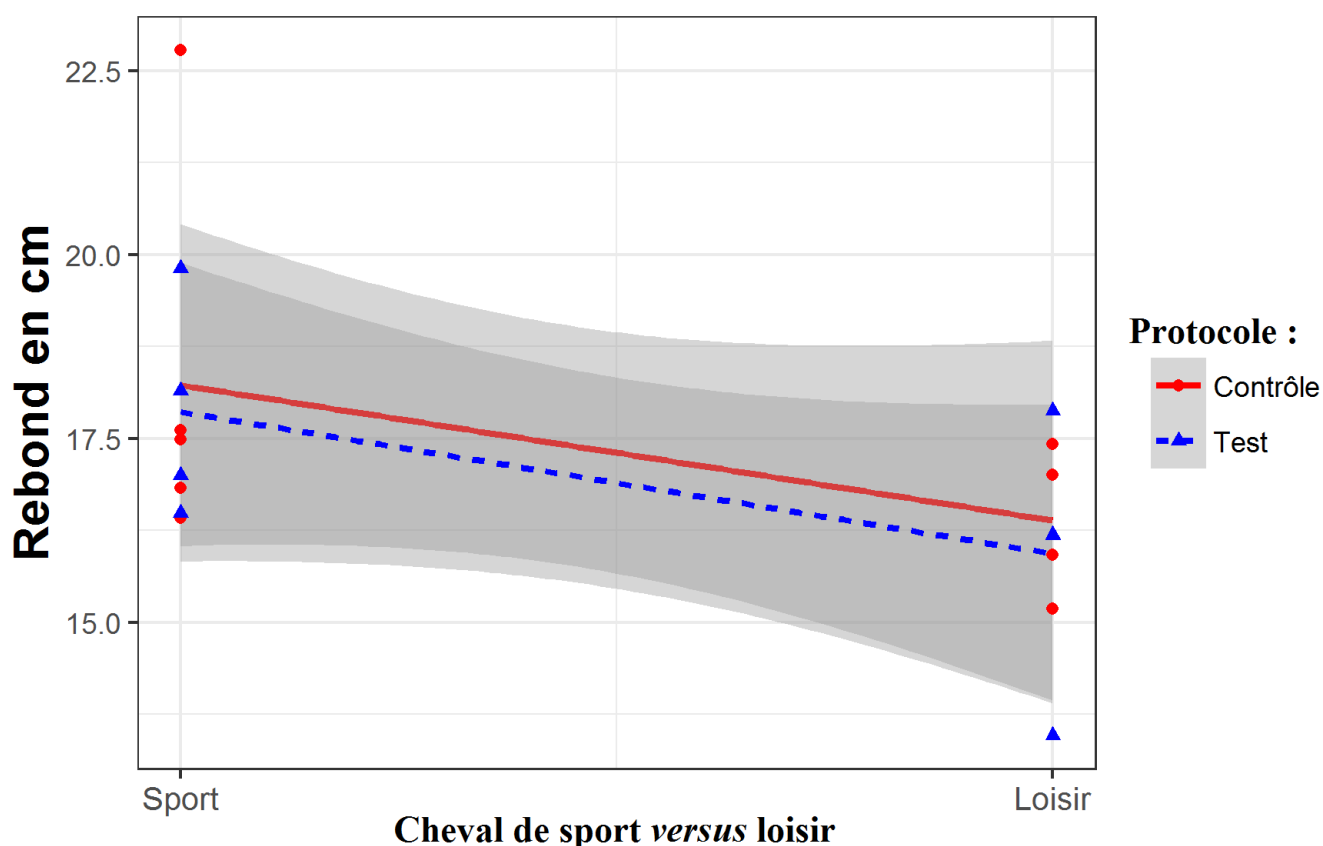
Rebond moyen en fonction du type d'effort

Il n'y avait pas de différence significative de rebond moyen au galop selon le type d'effort (protocole contrôle *versus* test). Les moyennes étaient respectivement de 17,03 *versus* 17,07 cm ($p=0,8$).

Rebond moyen en fonction du type de cheval

Au galop, le rebond moyen était significativement supérieur chez les chevaux de sport comparés aux chevaux de loisir : les moyennes étaient respectivement de 17,9 *versus* 16,1 cm ($p=0,03$). L'analyse de variance est représentée graphiquement par la figure 49 dans le cas du palier 1.

FIGURE 49 – Analyse de variance du rebond moyen au galop au palier 1 en fonction du type de cheval.



Au galop le rebond moyen était significativement plus élevé chez les chevaux de sport que chez les chevaux de loisir.

7. DISCUSSION

La conduite de cette étude et la lecture des résultats obtenus au cours de celle-ci suggèrent plusieurs remarques et réflexions. Elles concernent d'une part les forces et les faiblesses de notre protocole et d'autre part les perspectives d'étude de la charge de travail dans le cadre du développement d'*Equisense Motion*. Enfin, nous aborderons la question de la révolution technologique dans le contexte de la profession vétérinaire.

7.1 Les forces du protocole

Le protocole que nous avons conduit a été très standardisé. Nous avons vérifié qu'il était possible d'obtenir une séquence de travail très précise et les prélèvements ont tous pu être réalisés même sur des chevaux non habitués à ce type de manipulation. Ces enseignements permettent d'envisager d'utiliser les mêmes procédures pour faire évoluer les séquences de travail afin d'obtenir un effort plus important pour le protocole test par exemple. De plus, le fait que cette étude ait permis de récolter des données physiologiques et biomécaniques pour un type d'exercice très standardisé, représente une précieuse aide dans tout processus de développement.

Le matériel utilisé était adapté. Nous n'avons pas rencontré de problème particulier pour mesurer la FC sur les chevaux appareillés. Le capteur *Equisense Motion* a permis de recueillir les données biomécaniques sur les différents paliers des séquences contrôle et test. On pourrait imaginer le tester sur des séquences d'entraînement plus spécifiques comme l'obstacle ou d'endurance par exemple.

Ce type de protocole peut être envisagé aussi bien sur des chevaux de sport et de loisir. Il est important de constater que leurs paramètres physiologiques et les caractéristiques biomécaniques de leurs allures sont différents : d'une part la FC des chevaux de sport avait tendance à être plus faible que celle des chevaux de loisir au trot et au galop, d'autre part leur cadence au galop était plus faible que celle des chevaux de loisir et inversement leur rebond était plus élevé. Il faut donc en tenir compte lors d'exploration des liens entre caractéristiques biomécaniques des allures et charge de travail.

7.2 Les limites du protocole

Notre protocole ne nous a pas permis d'observer d'effet significatif du type d'effort sur les paramètres physiologiques. Nous n'avons donc pas pu par la suite relier charge de travail et caractéristiques biomécaniques des allures. Ces limites peuvent avoir plusieurs causes.

7.2.1 Importance de l'effort demandé dans le protocole test "transitions"

Nous étions partis de l'hypothèse qu'un nombre de transitions accru augmentait la charge de travail des chevaux. Les 2 paramètres physiologiques utilisés dans notre étude sont scientifiquement liés à l'effort comme nous l'avons rappelé dans la partie bibliographique (parties 3.2 et 3.3). Il apparaît que l'effort demandé dans le protocole test n'était pas suffisant pour faire varier significativement les 2 paramètres que sont la FC et la lactatémie.

Faire varier la FC nécessite sans doute un effort plus intense comme par exemple en introduisant des sauts dans la séquence d'entraînement ou en augmentant la vitesse des allures. La FC semble être un bon marqueur de l'effort cependant, nous l'avons vu évoluer avec les allures aux différents paliers lors de chaque séquence.

La lactatémie est affectée lors d'effort long. La durée de notre séquence d'entraînement était probablement trop courte pour influencer ce paramètre. Il faudrait donc repenser les exercices demandés dans les séances contrôle et test pour poursuivre cette étude.

7.2.2 Nombre d'individus

L'absence d'effet significatif du type d'effort observée précédemment peut sans doute s'expliquer en partie par le fait que notre étude ait porté sur un effectif réduit.

Le recrutement de chevaux de sport à une plus grande échelle suppose plus de moyens et de réseau, et le planning des professionnels comme de leurs chevaux est très chargé. En ce qui concerne les particuliers de l'écurie de propriétaires, si beaucoup étaient très curieux par rapport aux nouvelles technologies vétérinaires et désireux d'en savoir plus sur le métabolisme de leurs chevaux au travail, beaucoup étaient réticents à cause des indispensables prises de sang répétées, aussi petites soient les aiguilles. Les chevaux n'ont donc pu être sélectionnés que sur la base du volontariat et non par échantillonnage, ce qui limite la représentativité d'un point de vue statistique.

Les différences observées entre nos 2 protocoles sont, de plus, très faibles. Nous avons observé une augmentation de 4 % de la FC au trot entre le protocole contrôle et le protocole test et une baisse de la FC de 2 % au galop. Ces 2 résultats sont contradictoires. Pour

obtenir des différences significatives avec d'aussi faibles variations il faudrait un effectif extrêmement important.

7.2.3 Hétérogénéité des deux groupes de chevaux

Les protocoles contrôle et test étaient réalisés dans des conditions très proches pour chaque cheval (cavalier, matériel, endroit et moment de la journée identiques) mais, si le protocole était strictement le même pour les deux groupes, il convient de revenir sur plusieurs points de distinction entre chevaux de sport et chevaux de loisir.

Des conditions climatiques ajoutées à des infrastructures inégales

La qualité du sol (sable) était semblable dans les deux terrains mais l'un était couvert avec une bonne ventilation et l'autre, une carrière très exposée. Il s'est avéré que même en ayant rapproché le plus possible les jours d'expérimentation, il faisait sensiblement plus chaud et il y avait moins de vent lors du protocole avec les chevaux de sport. Les paramètres du lieu et de la météo n'ont pu être randomisés car il n'était pas prévu que nous transportions les chevaux. Cela a probablement avantagé les chevaux de loisir par rapport aux chevaux de sport et donc peut-être tendu à gommer la différence entre les deux groupes.

De plus, les chevaux de sport étaient dans une seule structure et les chevaux de loisir dans une autre. Nous ne pouvons donc pas différencier les effets « terrains » et "climat" de l'effet "type de cheval" dans notre protocole. Il aurait fallu recruter des chevaux de loisir et de sport dans les mêmes structures ou multiplier les structures participant à l'étude, ce qui n'était pas possible dans le cadre de cette thèse.

Travail et cavaliers

Les chevaux de CSO, très similaires dans leur profils (de race Selle Français, de score corporel 2,5 à 3 sur 5, âgés de 5 à 12 ans), étaient montés par la même cavalière professionnelle alors que les chevaux de loisir, de toutes races (Trotteur, Pur-sang, Anglo-arabe, New Forest), d'embonpoint plus variable (2,5 à 3,5) et d'âges plus variables (11 à 22 ans) avaient leurs cavaliers respectifs. La technique d'équitation de ces derniers était comparable mais leur morphologie variait.

De plus, les chevaux de sport suivaient un entraînement personnalisé mais très standardisé (sauts d'obstacles entre 110 et 130 cm) et quotidien alors que les chevaux de loisir avaient un travail plus aléatoire : certains chevaux étaient sortis -travail à pied, balade, reprise- 5 fois par semaine et d'autres seulement deux fois, notamment du fait de leur âge (pré-retraite).

L'homogénéité du groupe des chevaux de sport permettait de s'affranchir de nombreux facteurs de confusion alors qu'ils auraient dû être pris en compte dans l'analyse des résul-

tats pour les chevaux de loisir. Inversement, l'échantillon des chevaux de loisir était plus représentatif de la variabilité de cette population que celui des chevaux de sport.

7.3 Analyse des résultats

7.3.1 La lactatémie

Modalités de prise de sang et valeurs non détectées

La prise de sang destinée à la mesure de la lactatémie doit être réalisée le plus vite possible après l'effort. Dans la plupart des cas, l'aiguille orange dérangent peu les chevaux, la manœuvre était très rapide, mais il est arrivé que les chevaux soient surpris la première fois ou au contraire manifestent leur mécontentement face à la répétition du geste : la prise de sang a alors un peu plus tardé que les 20 secondes maximum prévues pour ce geste. Cependant, toutes les valeurs obtenues ont été conservées dans l'étude, celle-ci incluant un nombre déjà très réduit de chevaux.

Quatorze valeurs de lactatémie sur un total de 54 ont été inférieures à 0,8 mmol/l, seuil de détection par l'analyseur portable utilisé ("LOW"). Cela s'est observé aussi bien chez les chevaux de sport (6 sur 30 mesures soit 20 %) que chez les chevaux de loisir (8 sur 24 mesures soit 33 %), et aussi bien pour le protocole test (8 sur 27 mesures soit 30 %) que pour le protocole contrôle (6 sur 27 mesures soit 22 %). Il apparaît donc que le protocole mis au point n'a probablement pas été assez drastique comme nous l'avons déjà discuté ci-dessus. Le but n'était pas de travailler en anaérobie comme c'est le cas en course par exemple, mais d'atteindre des lactatémies détectables ($> 0,8$ mmol/l). Certains tests à l'effort de suivi médicosportif ne comportent que 2 min de pas, 2 min de trot, et 2 min de galop sans échauffement à proprement parler mais dans ce cas, ce sont justement les données "LOW" qui sont recherchées, et une augmentation importante de la lactatémie signe une affection sous-jacente.

Le choix d'attribuer arbitrairement la valeur de 0,7 mmol/l lorsqu'un "LOW" était obtenu est discutable. Pour certains chevaux, cela a pu constituer une surestimation de leur lactatémie. Si les effectifs avaient été plus importants, nous aurions pu supprimer ces valeurs. Cependant, le problème majeur est que le lactatomètre utilisé n'était pas assez sensible pour nos conditions d'étude. À l'avenir, nous aurions intérêt à utiliser des analyseurs tels que le Radiometer ABL90 (RADIOMETER, Danemark) ou le Nova Statstrip Xpress (NOVA BIOMEDICAL, EU), capables de détecter des lactatémies dès respectivement 0,1 et 0,3 mmol/l (Bonaventura, 2015).

Une donnée difficilement exploitable dans notre étude

La multiplication des transitions (42 dans le protocole test) avec pour intention d'objectiver l'impact sur la charge de travail n'a pas abouti à des résultats significatifs, contrairement à notre hypothèse. Les valeurs de lactates restaient basses : elles correspon- daient à des valeurs attendues pour un travail modéré sur le plat (Desmet et al. 1996) et non à un effort intense. Il n'y avait aucune accumulation au dernier palier, tous chevaux confon- dus. Cela concorde avec les résultats de Thornton et al. (1985) : la répétition de paliers d'exercices induisant moins de 4 mmol/l de lactatémie ne provoquait pas d'accu- mulation lactique, contrairement à ceux induisant plus de 4 mmol/l de lactatémie.

Le fait que notre protocole test ne représentait pas un effort plus intense du point de vue de la lactatémie, par rapport au protocole contrôle, peut s'expliquer par un nombre de transitions trop faible et/ou par un effectif de chevaux trop réduit pour ne pas manquer de puissance statistique. La mesure de la lactatémie est un très bon outil, utilisé par toute la communauté scientifique et en particulier les vétérinaires en médecine sportive à juste raison, mais ce critère n'était peut être pas pertinent dans un contexte d'évaluation de la charge de travail d'une séance sans obstacles, à vitesse modérée et d'une durée limitée.

7.3.2 La fréquence cardiaque

Qualité des données de fréquence cardiaque

La FC est un paramètre grandement influencé par l'excitation et le stress, mais dans notre cas, l'impact des facteurs extrinsèques a été minimalisé par le fait que les chevaux soient testés dans leur environnement de travail habituel.

À plusieurs reprises, l'électrode verte du Télévet s'est détachée à cause du frottement du câble contre la sangle pendant le mouvement. Les mesures ont été tout de même conservées car les artéfacts étaient bien compensés par les autres électrodes et le tracé restait correct. Les FC moyennes obtenues étaient caractéristiques de chaque allure (60-90 bpm au pas, 100-115 bpm au trot, 120-135 bpm au galop). Le Télévet s'est révélé un instrument très fiable et très facile d'utilisation.

Analyse par allure

- **Au pas**, il n'y avait pas de différence significative de FC moyenne selon le type d'effort et le type de cheval. Cela n'est pas un résultat étonnant car il ne s'agit pas d'une allure discriminante. La FC était proche de la FC au repos au début de l'exercice. Entre les transitions, elle n'était pas stable à cause du phénomène de récupération.

- **Au trot et au galop**, il n’y avait pas d’impact significatif de l’augmentation du nombre transitions sur la FC moyenne, tous chevaux confondus. Nous retrouvons ici les mêmes limites de notre protocole que mentionnées dans la partie concernant la lactatémie. Les chevaux de loisir tendaient cependant à atteindre des FC moyennes plus hautes plus rapidement que les chevaux de sport. Un plus grand échantillon aurait pu transformer cette tendance d’effet de l’entraînement en différence significative.

Les mesures de la lactatémie et de la FC lors de ce protocole n’ont pas permis de mettre en évidence de façon significative un lien entre l’augmentation du nombre de transitions et l’augmentation de la charge de travail. Notre hypothèse n’a donc pas pu être vérifiée dans ces conditions. Il n’est pas exclu d’obtenir de meilleurs résultats en recrutant plus de chevaux dans un protocole incluant encore plus de transitions.

7.3.3 Les paramètres biomécaniques

Aucune différence significative de cadence et de rebond moyen n’a été mise en évidence entre les protocoles contrôle et test. Ces paramètres n’étaient pas modifiés par l’ajout des transitions, ils semblaient, dans notre cas, dépendre uniquement du facteur entraînement. En effet, les chevaux de sport avaient un meilleur rebond et une meilleure cadence dans toutes les conditions, de façon significative au galop. Le facteur "race" et les allures naturelles associées peuvent sans doute en partie expliquer ces différences. Mais le facteur entraînement semblait jouer un rôle majeur dans notre étude.

Effet de la mise en équilibre

Il faut aussi prendre en considération le fait que les chevaux de sport étaient montés par une cavalière professionnelle et les séances du protocole constituaient le travail du jour. La cavalière leur a donc demandé une attitude rassemblée comme lors de leur entraînement habituel. Si l’attitude "basse et ronde" (semblable à celle obtenue avec des rênes allemandes simplement ajustées) par rapport à "haute et ouverte" (cheval libre) n’augmente que légèrement la FC et la lactatémie (Sloet, 2006), le fait que le cheval soit activement travaillé, *a fortiori* par une cavalière de haut niveau, participe à sa mise en équilibre et ainsi à l’amélioration de ses paramètres biomécaniques, en plus d’une meilleure réactivité. Les chevaux de loisir ont plus évolué dans la décontraction lors des séances, sans sortir de leur zone de confort. Ces chevaux étaient montés sans mors, car il s’agissait d’une écurie à tendance éthologique. Cela a dû contribuer à creuser l’écart déjà existant entre les deux groupes en termes de qualité de la locomotion.

Charge de travail au pas

Dans notre étude, ni les paramètres physiologiques, ni les caractéristiques biomécaniques des allures n'étaient affectés par le type d'effort ou le type de cheval au pas. Cela semblait être en faveur d'une non prise en compte de ces données. Cependant, il semblerait que la mise du cheval au marcheur automatique (dispositif utilisé pour faire marcher un ou plusieurs chevaux sans nécessité de personnel pendant une période plus ou moins longue, à une vitesse modulable), qui fait le plus souvent partie intégrante du travail, induit une fatigue vraie et peut se substituer à une partie du temps d'entraînement. En effet, il se vérifierait que les résultats des tests à l'effort des chevaux de sport mis au marcheur étaient moins bons que ceux des chevaux qui n'y vont pas. Le travail au pas en continu pendant des durées conséquentes doit donc être pris en compte dans l'entraînement des chevaux de sport.

La cadence/le rebond : des paramètres faisant varier la charge de travail ?

Dans l'optique d'identifier des paramètres d'intérêt pour améliorer l'algorithme du capteur *Equisense Motion* pour la quantification de la charge de travail sous forme de jauge, le facteur "nombre de transitions" n'a pas permis de créer une charge de travail accrue. Cela ne nous permet pas d'estimer la pertinence des paramètres biomécaniques dans l'évaluation de la charge de travail.

Mesurer la "pénibilité" d'une séance de manière indépendante du cheval est un défi qui nécessite plus de recherche et développement. À la durée totale de la séance et la durée moyenne des phases de trot et galop, pondérées entre elles, pourraient s'ajouter comme paramètres de l'équation, le rebond et la cadence. Ces données, si elles sont désormais facilement mesurables grâce aux nouvelles technologies, se prêtent cependant difficilement aux expériences, car cela suppose qu'elles soient nécessairement fixées. En effet, comment demander à un cavalier de modifier la cadence de son cheval, sans modifier la vitesse et l'amplitude ? Mettre en place un nouveau protocole pour vérifier l'hypothèse que la cadence ou le rebond influent sur la charge de travail s'annonce très complexe.

L'intérêt du capteur serait sans doute à rechercher plutôt dans des valeurs relatives, propres à chaque cheval. Il est possible de mesurer objectivement l'évolution de la qualité des allures au cours de l'entraînement sur de longues périodes par exemple. Chaque cavalier peut estimer la durée des séquences aux différentes allures de son cheval à chaque séance d'entraînement et établir un programme pour progresser en durée tout en conservant une bonne qualité des allures. Mesurer la charge de travail avec ce type de capteur est une gageure : il est fortement probable qu'au fil du temps et de l'entraînement, l'effort diminue pour chaque cheval pour une même séquence d'allures identiques.

7.4 Ouverture : vers un monde du cheval connecté

7.4.1 *Care*, le second produit d'Equisense, en développement

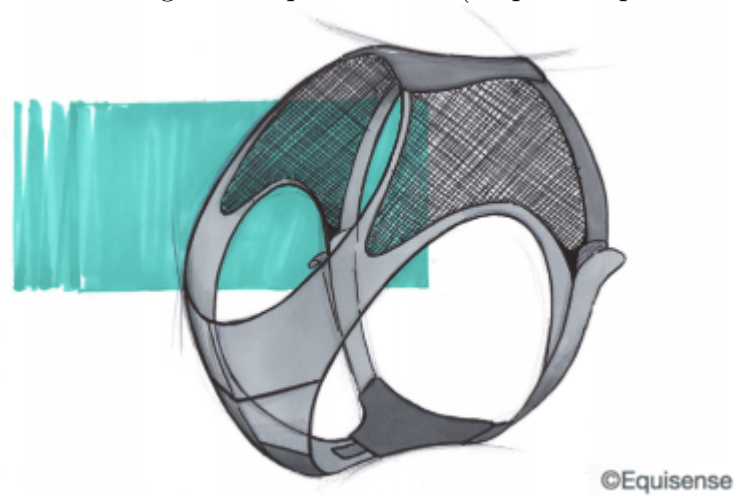
Du constat que l'équitation est un sport basé sur le ressenti, avec beaucoup d'empirisme sans possibilité de confronter ses sensations à des données objectives est né le capteur *Equisense Motion*. Un second besoin s'exprime du côté des cavaliers : surveiller plus précisément le cheval, notamment pendant les périodes d'importantes compétitions. Le travail du vétérinaire équin pourrait en être facilité. En effet, les interventions ne sont pas toujours aussi précoces que ce que l'on voudrait car la douleur du cheval n'a été détectée que tardivement, si l'on considère un cas classique de colique par exemple.

Ainsi, un second capteur sous forme de *body* connecté est en développement, avec une technologie de suivi de données physiologiques et comportementales du cheval au repos (FC, fréquence respiratoire, agitation et sommeil) (Figure 50 et 51).

FIGURE 50 – Dispositifs *Motion*, pour cheval au travail et *Care*, pour le cheval au repos (d'après "Equisense-Web").

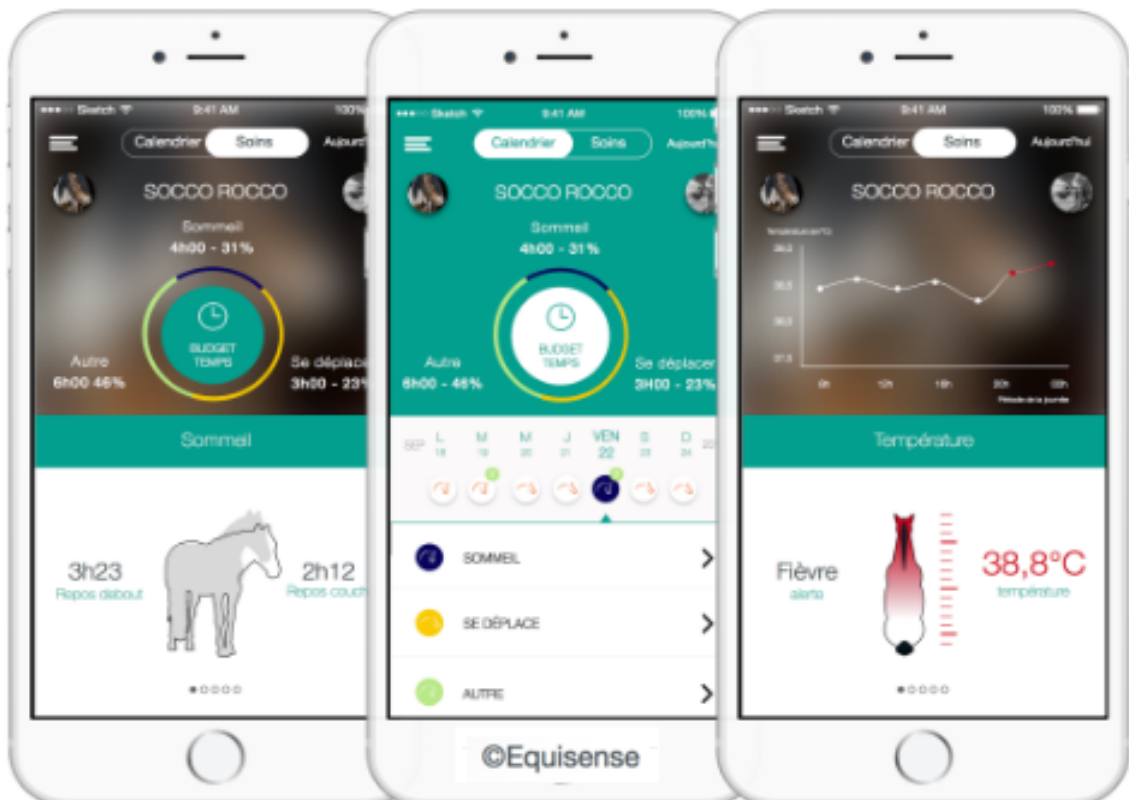


FIGURE 51 – Design du dispositif *Care* (d'après "Equisense-Web").



À terme, l'objectif est cette fois-ci de permettre une surveillance rapprochée et permanente dans un contexte de suivi du cheval athlète ou de la gestion du cheval à risque (hospitalisation, poulinage, *etc.*), toujours grâce à une application mobile (Figure 52).

FIGURE 52 – Exemple de visuels de l'application *Care* (d'après "Equisense-Web").

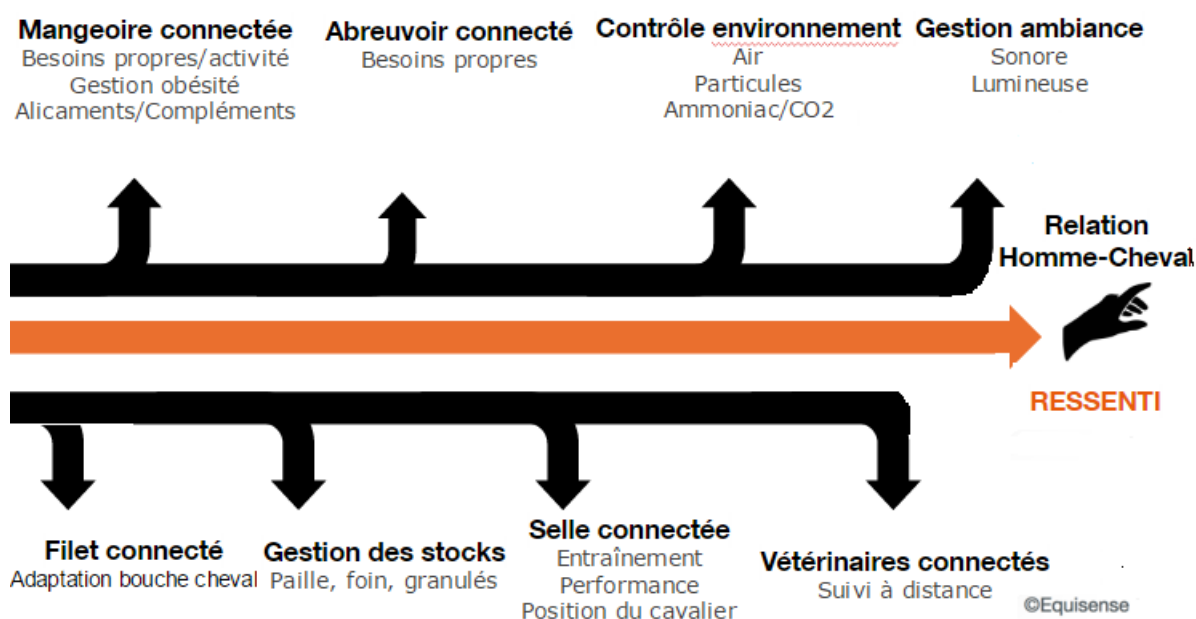


Ce dispositif concerne donc en premier lieu les professionnels de la filière équine : vétérinaires, écuries de sport et de course, et éleveurs. D'une part, il s'agit d'améliorer le suivi du cheval au quotidien, dans l'environnement stressant qui est celui du monde de la compétition (détection d'une agitation non pathologique, au box ou lors d'un déplacement en camion par exemple), au service de meilleures performances. L'application donne l'alerte immédiatement en cas de hausse anormale de la FC ou de la fréquence respiratoire, ou encore d'agitation accrue telle des signes de colique, une mise bas.

7.4.2 Connecter une écurie ?

Les objets connectés arrivent actuellement à vitesse grand V dans le milieu de l'équitation de la même façon qu'ils sont arrivés dans nos maisons et dans nos vies en général. Il n'est donc pas impossible de penser que demain les vétérinaires auront affaire à des "écuries connectées" : mangeoire, abreuvoir, harnachement seront connectés. La qualité de l'air et l'ambiance sonore ou lumineuse seront mieux contrôlées, les stocks seront gérés automatiquement ; et les professionnels de santé pourront évaluer à distance l'évolution des chevaux suivis et adapter leurs traitements. Il faut s'attendre à un gain de temps mais aussi à une nouvelle façon de pratiquer le métier qui s'annonce (Figure 53).

FIGURE 53 – Perspectives de connexions dans l'écurie de demain (d'après www.equisense.com, présentation AVEF).



7.4.3 Comment intégrer le vétérinaire dans cette révolution numérique ?

La question qui découle de ces changements importants est : comment intégrer le vétérinaire dans ce monde du cheval connecté ? Pour ne pas que son rôle soit totalement éclipsé, il convient de réfléchir dès à présent aux adaptations indispensables pour l'avenir de la profession, de manière à inclure le vétérinaire, et qu'il puisse encore mieux faire valoir son expertise grâce à ces nouvelles technologies (Figure 54).

FIGURE 54 – Le champs des possibles à court terme dans le passage à l'ère du "cheval connecté" (d'après www.equisense.com).



Prenons quelques exemples concrets.

- Pour les **praticiens**, la prise en charge des affections locomotrices peut être facilitée : y a-t-il une amélioration de la qualité de la locomotion après un traitement local (infiltrations, mésothérapie) ou plus global (ostéopathie, cures de nutriments) ? Le suivi de l'observance du traitement et des protocoles de rééducation (trottings fractionnés en ligne droite) est-il optimal ? Les données sont objectives et le suivi peut se faire dans le temps et à distance.
- Pour les **nutritionnistes**, une meilleure qualité de conseil peut être déployée après visualisation précise du type et de l'intensité moyenne des séances de chaque cheval.
- En termes de **surveillance du dopage**, on peut aussi espérer une meilleure gestion des traitements donnés grâce à des calendriers de soins avec rappels et alertes.

Ceci est une évolution que l'on peut prévoir à court terme. Mais ce n'est pas tout.

7.4.4 À plus long terme : vers un *bigdata* du cheval

L'intérêt de la connexion du monde du cheval à plus long terme est de remonter un maximum de données, à grande échelle, et d'y avoir accès dans le but de traiter ces données, tel un *bigdata* du cheval. Cela permettrait de coupler des données récoltées dans des champs très différents (physiologiques, environnementales, biomécaniques, *etc.*) pour faire de l'analyse tendancielle, c'est-à-dire de la prédiction.

Voici quelques applications possibles au niveau de la recherche, si l'on tente de se projeter dans le futur !

- **Sélection génétique** : améliorer les différentes races via une meilleure connaissance de l'héritabilité de certaines affection en fonction des lignées, comme par exemple dans le cas des myosites par mutation de gènes responsables du stockage du glycogène dans les muscles.
- **Industrie pharmaceutique** : pouvoir développer, améliorer les traitements, en fonction du suivi de l'observance, améliorer le mode de prise en étudiant la galénique. Pouvoir anticiper une production de tel ou tel vaccin en fonction des modèles prédictifs ?
- **Nutrition** : aider au développement de nutriments sur mesure, qui contribuent à la prévention des affections.
- **Zootchnie** : analyser l'environnement direct du cheval en vue d'améliorer les bâtiments pour le bien-être du cheval. Il ne faut pas oublier que ce domaine est très en retard pour les chevaux, par rapport aux vaches notamment.
- **Prévention anti dopage** : faire des suivis longitudinaux, éviter des interactions. . .
- **Assurances** : cela est controversé mais comme chez l'humain, on peut imaginer une adaptation des forfaits d'assurance selon profil du cheval et son activité via les données remontées.

CONCLUSION

Cette étude n'a pas pu démontrer d'influence de l'augmentation du nombre de transitions sur la charge de travail en se basant sur les mesures de FC et de lactatémie. Les paramètres biomécaniques mesurés dans cette étude n'ont, par conséquent, pas pu être reliés à la charge de travail chez le cheval.

Nous avons observé des différences entre les chevaux de sport et de loisir. La fréquence cardiaque des chevaux de sport avait tendance à être plus faible pendant les séquences d'entraînement que celle des chevaux de loisir. Les chevaux de sport ont présenté une cadence plus faible et un rebond plus élevé au galop que les chevaux de loisir.

Ainsi, nous n'avons pas pu conclure quant à l'intérêt du capteur *Equisense Motion* pour mesurer la charge de travail chez le cheval : notre protocole n'a pas entraîné un effort suffisant pour pouvoir conclure. De plus, le faible nombre de chevaux engagés dans l'expérimentation a limité la puissance statistique de l'analyse.

Le capteur a permis de caractériser de façon pertinente les allures des chevaux observés. Les différences d'allure observées entre les chevaux de sport et de loisir ont été objectivées par le capteur *Equisense Motion*.

Nous n'avons pas pu objectiver la capacité du capteur à jauger la charge de travail d'une séance mais il est, à l'heure actuelle, adapté pour un suivi longitudinal des performances d'un cheval à l'entraînement. Il peut ainsi répondre à une demande de suivi du cheval athlète dans le contexte de la compétition de haut niveau. Des applications vétérinaires sont aussi possibles (suivi de la récupération après un traitement par exemple) et méritent l'attention de la profession.

BIBLIOGRAPHIE

- ART, T, AMORY H et LEKEUX P, « Notions de base de physiologie de l'effort », *in* : *Prat. Vét. Equine* 32 numéro spécial (2000), p. 247–254.
- ART, T, ANDERSON L et WOAKES A, « Mechanics of breathing during strenuous exercise in thoroughbred horses », *in* : *Respiration Physiology* 82 (1990), p. 279–294.
- AUVINET, B, GALLOUX P et GOUPIL X, « Cinétique des lactates sanguins chez le cheval de concours complet d'équitation, intérêt de la récupération active », *in* : *17ème journée d'étude du CEREOPA, Ecole nationale d'équitation*, (1991), p. 108–120.
- AUVINET, B et DEMONCEAU T, « Physiologie comparée de l'effort chez l'Homme et chez le Cheval », *in* : *Equathlon* 3 (11) (1991), p. 5–10.
- BARREY, E, « Evaluation de l'aptitude sportive chez le cheval : application à la définition de critères précoces de sélection », *in* : *INRA Productions animales* hs (1992), p. 167–173.
- BARREY, E et DEMONCEAU T, « Détermination du seuil anaérobie chez le cheval-athlète », *in* : *EquAthlon* 2 (8) (1990), p. 25–28.
- BAYLY, WM, GABEL AA et BARR SA, « Cardiovascular effects of submaximal aerobic training on a treadmill in standardbred horses using a standardized exercise test », *in* : *Am J. Vet. Res* 44 (4) (1983), p. 544–553.
- BAYLY, WM, GRANT B et PEARSON R, « Lactate concentrations in Thoroughbred horses following maximal exercise under field conditions », *in* : *Equine Exercise Physiology* 2 (1983), p. 426–437.
- BONAVENTURA, J, SHARPE K et KNIGHT E, « Reliability and Accuracy of Six Hand-Held Blood Lactate Analysers », *in* : *J Sports Sci Med*. 14 (1) (2015), p. 203–214.
- BROOKS, GA(1), « Anaerobic threshold : a review of the concept and directions for future research », *in* : *Med Sci Sports Exerc*. 17 (1) (1985), p. 22–34.
- BROOKS, GA(2), « The lactate shuttle during exercise and recovery », *in* : *Med Sci Sports Exerc*. 18 (3) (1986), p. 360–368.
- BROOKS, GA(3), « Currents concepts in lactates exchange », *in* : *Med Sci Sports Exerc*. 23 (8) (1991), p. 895–906.
- CARLSON, G, « Hematologic alterations in endurance-trained horses », *in* : *Proceeding of the First International Symposium on equine Hematology* Michigan State University (1975).

- CLAYTON, MH, LANOVAZ JL et SCHAMHARDT HC, « The effects of a rider's mass on ground reaction forces and fetlock kinematics at the trot », *in* : *Equine Vet. J.* 30 (1999), p. 218–222.
- COUROUCE, A, *Contribution à l'évaluation de la charge de travail du cheval trotteur à l'entraînement et en course*, Nantes : Thèse Doctorat Vétérinaire, 1993.
- COUROUCE, A, CHRETIEN M et VALETTE JP, « Physiological variables measured under field conditions according to age and state of training in French Trotters », *in* : *Equine Vet J.* 34 (1) (2002), p. 91–97.
- COUROUCE, A et GEFFROY O, « Le suivi médico-sportif de l'athlète au quotidien », *in* : *EquAthlon* VI ème entretiens de Laval (2000), p. 10–15.
- COUROUCE, A, GEFFROY O et BARREY E, « Comparison of exercise tests in French trotters under training track, racetrack and treadmill conditions », *in* : *Equine Vet J.* 30 (1999), p. 528–530.
- CRIELAARD, J, MAERTENS B et FRANCHIMONT P, « Bases biochimiques comparées des techniques d'entraînement chez l'homme et le cheval », *in* : *Congrès National de Médecine et Sports équestres de Saumur* (1985), p. 104–113.
- DAUVILLIER, J et Van ERCK E, « L'âge limite-t-il l'exercice ? Comment prolonger la carrière sportive », *in* : *Pratique vétérinaire équine* N°spécial (2013), p. 74–79.
- DAVIE, AJ, PRIDDLE TL et EVANS DL, « Metabolic responses to submaximal field exercise tests and relationships with racing performance in pacing Standardbreds », *in* : *Equine Vet. J.* 34 (2002), p. 112–115.
- DEMONCEAU, T et AUVINET B, « Test d'effort de terrain pour trotteurs à l'entraînement : réalisation pratique et premiers résultats », *in* : *Compte-rendu de la 18ème Journée d'Etude CEREOPA, Paris* (1992), p. 120–132.
- DEMONCEAU, T, GUEZENNEC C et BIGARD A, « Typologie musculaire du cheval d'endurance : relation avec aptitude aérobie », *in* : *EquAthlon* 5 (18) (1993), p. 18–201.
- DESJARDINS, I et CADORE J, « Analyses sanguines équines », *in* : *Prat. Vet. Equine* 38 (152) (2006), p. 7–16.
- DESMECHT, D, LINDEN A AMORY H ART T et LEKEUX P, « Relationship of plasma lactate production to cortisol release following completion of different types of sporting events in horses », *in* : *Vet. Res. Comm.* 20 (1996), p. 371–379.
- EQUISENSE-WEB, 15-10-2016, URL : <http://www.equisense.com>.
- ESSEN-GUSTAVSSON, B, *Activity and inactivity related muscle adaptation in the animal kingdom*, Saltin B. Editors, 1985, p. 90-102.
- ESSEN-GUSTAVSSON, B et LINDHOLM A, « Muscle fibre characteristics of active and inactive Standardbred horse », *in* : *Equine Vet. J.* 17 (6) (1985), p. 434–438.
- EUROPE DRESSAGE, 19-04-2017, URL : <http://www.eurodressage.com>.

- EVANS, D et ROSE R(1), « Maximum oxygen uptake in race horses : changes with training state and prediction from submaximal cardiorespiratory measurements », *in* : *Equine Exercise Physiology 2* ICEEP publications, Davis (1987), 52–67).
- EVANS, D et ROSE R(2), « The cardiovascular and respiratory response in Thoroughbred horses during treadmill exercise », *in* : *J. exp. Biol* 134 (1988), p. 397–408.
- FÉDÉRATION FRANÇAISE D'ÉQUITATION, 10-12-2016, URL : <http://www.ffe.fr>.
- FORTIER, G, BERMAN F et COUROUCE A, « Approche hématologique et biochimique dans le suivi médico-sportif du cheval athlète : intérêts et limites. Bilan à l'exercice et à l'entraînement », *in* : *Prat. Vét. Equine* 32 (2000), p. 103–107.
- FRANKLIN, S, « Physiology and biochemistry of exercise », *in* : *Proceeding ICEEP-Utrecht* (2016).
- GALLOUX, P(1), *Contribution à l'élaboration d'une planification de la préparation énergétique du cheval de concours complet : suivi de l'entraînement par la mesure de la fréquence cardiaque et le dosage de la lactatémie*. Université de Poitiers : Thèse de doctorat, 1991, p. 64-80.
- GALLOUX, P(2), *Concours complet d'Équitation*, BELIN, 2011, p45-79.
- GOLLAND, LC, EVANS DL et MCGOWAN CM, « The effects of overtraining on blood volumes in Standardbred Racehorses », *in* : *The Vet. J.* 165 (2003), p. 228–233.
- GOUPIL, X, *Suivi de l'entraînement de chevaux de concours complet d'équitation par enregistrement de la fréquence cardiaque et dosage de la lactatémie*, Nantes : Thèse Doctorat Vétérinaire, 1990.
- HENCKEL, P, « Training and growth induced changes in the middle gluteus muscle of young Standardbred Trotters », *in* : *Equine Vet. J.* 15 (1983), p. 134–140.
- HISTOLOGIE ET GÉNÉTIQUE, 30-09-2016, URL : <http://www.histgen.com>.
- HODGSON, D, MCGOWAN C et MCKEEVER K, *The athletic horse, 2nd Edition*, Saunders, 2013, p. 111-131.
- HODGSON, D, Mc CUTCHEON LJ et BYRD SK, « Dissipation of metabolic heat in the horse during exercise », *in* : *J. Appl. Physiol.* 74 (1993), p. 1161–1165.
- HODGSON, D, ROSE R et ALLEN J, « The effects of a submaximal treadmill training programme on histochemical properties, enzyme activities and glycogen utilisation of skeletal muscle in the horse », *in* : *Equine Vet. J.* 17 (1985), p. 30–305.
- HODGSON, D, DAVIS RE et Mc CONAGHY F, « Thermoregulation in the horse in response to exercise », *in* : *Br. Vet. J.* 150 (1994), p. 219–223.
- HÖRNICKE, H, MEIXNER R et POLMANN U, « Respiration in exercising horses », *in* : *Equine Exercise Physiology 1* (1983), p. 7–16.
- HOWALD, H et WASSERMANN D, *Bioénergétique de l'exercice musculaire et de l'entraînement physique*, PUF, 1988, p. 52-58.

- HOYT, DF et TAYLOR CR, « Gait and the energetics of locomotion in horses », *in* : *Nature* 292 (1981), p. 239–240.
- INSTITUT FRANÇAIS DU CHEVAL ET DE L'ÉQUITATION, 13-10-2016, URL : <http://www.ifce.fr>.
- JACOBS, I, « Blood lactate, implications for training and performance », *in* : *Sports Med.* 3 (1982), p. 10–25.
- JORDFELD, L, JUHLIN-DANFELT A et KARLSSON J, « Lactate release in relation tissue lactate in human skeletal muscle during exercise », *in* : *J. Appl. Physiol.* 44 (1978), p. 350–352.
- JOSE-CUNILLERAS, E et HINCHCLIFF KW, « Physiology and biochemistry of exercise », *in* : *Equine and comparative exercise physiology* 1 (1) (2004), p. 23–30.
- JUDSON, G, FRAUENFELDER H et MOONEY G, « Biochemical changes in Thoroughbred Racehorses following submaximal and maximal exercise », *in* : *Equine Exercise Physiology 2* ICEEP publications (1987), p. 408–415.
- KINDERMANN, W, SIMON G et KEUL J, « The significance of the aerobic-anaerobic transition for determination of work load intensities during endurance training », *in* : *J. Appl. Physiol* 42 (1979), p. 25–34.
- KIRSCH, K, DUE M HOLZHAUSEN H SERTEYN D et SANDERSEN C, « Variations des valeurs de fréquence cardiaque et des taux de lactate lors de l'entraînement et de la compétition chez les chevaux de concours complet de niveau 41 à 4 étoiles », *in* : *43ème Journée de la Recherche Equine IFCE* 1 (2017), p. 93–98.
- KUBO, K, TAKAG S et MURAKAMI M, « Heart rate and blood lactate concentration of horses during maximal work », *in* : *Full. Equine. Res. Inst.* 21 (1984), p. 39–45.
- LEDRAOULEC, T, *Le dosage de la lactatémie dans le suivi médico-sportif du cheval trotteur*, Thèse Doctorat Vétérinaire, Nantes, 1992, p.79-86.
- LELEU, C, *Analyse des facteurs locomoteurs de performance chez le cheval Trotteur*, Thèse Doct.Sci-FA., 2004, p. 85-99.
- LELEU, C, COTREL C et COUROUCE A, « Relationships between physiological variables and race performance in French Standardbred trotters », *in* : *Vet. Rec.* 156 (2005), p. 339–342.
- LOVELL, DK et ROSE RJ, « Effects of post exercise activity on recovery from maximal exercise », *in* : *Equine Exercise Physiology* 4 (1995), p. 312–320.
- LOVELL, DK, REID TA et ROSE RJ, « Effects of maximal exercise on equine muscle : changes in metabolites, pH and temperature », *in* : *Equine Exercise Physiology* 2 (1987), p. 312–320.
- MARLIN, DJ, HARRIS PA SCHROTER RC et HARRIS RC, « Physiological, metabolic and biochemical responses of horses competing in the speed and endurance phase of a CCI*****3-day-event », *in* : *Equine Vet. J. Suppl.* 20 (1995), p. 37–41.

- MARLIN, DJ, HARRIS RC et SNOW DH(1), « Influence of post-exercise activity on rate of muscle and blood lactate disappearance in the thoroughbred horse », *in* : *Equine exercise physiology 2- ICEEP Publications, Davis* (1987), p. 188–195.
- MARLIN, DJ, HARRIS RC et SNOW DH(2), « Rates of blood lactates disappearance following exercise of different intensities », *in* : *Equine exercise physiology 3- ICEEP Publications Davis* (1991), p. 188–195.
- MARSLAND, WP, « Heart rate response to submaximal exercise in the Standardbred horse », *in* : *J. Appl. Physiol.* 24 (1) (1968), p. 98–101.
- MCARDLE, W, KATCH F et KATCH V, *Exercise Physiology : Nutrition, Energy, and Human Performance*, PUF, 2014, p.33-49.
- MCGOWAN, CW, GOLLAND LC et EVANS DL, « Effects of prolonged training, over-training and detraining on skeletal muscle metabolites and enzymes », *in* : *Equine Vet. J.* 34 (2002), p. 257–263.
- McKEEVER, KH et SCHURG WA, « Exercise training-induced hypervolemia in the horse », *in* : *Med. Sci. Sports Exerc.* 19 (1987), p. 21–27.
- McMIKEN, D, « An energetic basis for equine performance », *in* : *Equine Vet. J.* 15 (1983), p. 123–133.
- MONOD, H et FLANDROIS R, « L'énergétique des activités physiques », *in* : *Physiologie du sport* (1985), p. 1–28.
- MULTIMÉDIA, BIOLOGIE ET, 02-10-2016.
- MUNSTERS, CC, IWAARDEN A et VANWEEREN R MUNSTERS, « Exercise testing in Warmblood sport horses under field conditions », *in* : *The Veterinary Journal* 1 (2014), p. 11–19.
- MUNSTERS, CC, VANDENBROEK J et WELLING E, « A prospective study on a cohort of horses and ponies selected for participation in the European Eventing Championship : reasons for withdrawal and predictive values of fitness tests », *in* : *BMC Vet. Res.* 9 (2013), p. 182.
- PEHAM, C et SCHOBESBERGER H, « Influence of the rider on the variability of the equine gait Influence of the load of a rider or of a region with increased stiffness on the equine back, a modelling study », *in* : *Equine Vet. J.* 36 (8) (2004), p. 703–705.
- PEHAM, C, LICKA T et SCHOBESBERGER H, « Influence of the rider on the variability of the equine gait », *in* : *Hum. Mov. Sci.* 23 (2004), p. 633–671.
- PERSSON, SGB, « Evaluation of exercise tolerance and fitness in the performance horse », *in* : *Equine Exercise Physiology* 1 (1983), p. 441–457.
- PERSSON, SGB, ESSEN-GUSTAVSSON B et FUNKQUIST P, « Plasma, red cell and whole blood lactate concentrations during prolonged treadmill exercise at VLA4 », *in* : *Equine Vet. J. Suppl.* 18 (1995), p. 104–107.
- PERSSON, SGB et ULLBERG LE, « Blood volume in relation to exercise tolerance in trotters », *in* : *J. S. Afr. Vet. Assoc* 45 (4) (1974), p. 293–299.

- PORTAIL DES STATISTIQUES, 29-07-2016, URL : <https://fr.statista.com/themes/2972/les-objets-connectes/>.
- RAINER, JE, EVANS DL et HODGSON DR, « Blood lactate disappearance after maximal exercise in trained and detrained horses », *in* : *Research in Veterinary Science* 57 (1994), p. 325–331.
- RIEU, M, « Récupération des efforts lactiques », *in* : *La récupération de l'effort sportif* 7ème séminaire de bioénergétique (1987), p. 9–14.
- RIVERO, JL et AGUERA E, « Comparative study of muscle fiber type composition in the middle gluteal muscle of andalusian, thoroughbred and arabian horses », *in* : *Journal of Veterinary Science* 9 (6) (1989), p. 337–339.
- ROGERS, CW, RIVERO JL et VanBREDA E, « Describing workload and scientific information on conditioning horses », *in* : *Equine and Comparative Exercise Physiology* 4 (1) (2007), p. 1–6.
- ROSE, R, « Effets de l'entraînement- Etudes expérimentales chez le cheval », *in* : *EquiAthlon* VI ème entretiens de Laval (2000), p. 46–49.
- ROSE, R et EVANS D, « Cardiovascular and respiratory function in the athletic horse », *in* : *Equine Exercise Physiology 2* ICEEP publications (1987), p. 9–14.
- SCHROTER, RC, BAYLIS E et MARLIN DJ, « Gait, estimated net cost of transport and heat production at different speeds in three-day-event horses », *in* : *Equine Vet J Suppl.* July (22) (1996), p. 16–23.
- SLOET, MM, BARNEVELD A et SCHAMHARDT HC, « Effects of weight and riding on workload and locomotion during treadmill exercise », *in* : *Equine veterinary journal* 18 (1995), p. 413–417.
- SLOET, MM, WENSING TH BARNEVELD A et BREUKINK HJ, « Work-load in the horse during vaulting competition », *in* : *Equine Exercise Physiology* 3 (1991), p. 331–336.
- SLOET, MM, SPIERENBURG AJ et VAN DEN BROEK ETW, « The workload of riding-school horses during jumping », *in* : *Equine Vet Journal* 36 (2006), p. 93–97.
- SLOET, MM et CLAYTON HM, « Advantages and disadvantages of track vs. treadmill tests », *in* : *Equine Vet J Suppl* 30 (1999), p. 645–647.
- SLOET, MM, BLOK MB et BEGEMAN L, « Workload and stress in horses : comparison in horses ridden deep and round ('rollkur') with a draw rein and horses ridden in a natural frame with only light rein contact », *in* : *Tijdschr Diergeneeskd* 131 (2006), p. 110–114.
- SNOW, DH et VALBERG S, « Muscle anatomy, physiology and adaptation to exercise and training », *in* : *Res. Vet. Sci.* 28 (1994), p. 137–144.
- TELEVET-WEB, 02-01-2017, URL : <http://www.televet.de>.
- THIRIEZ, P, *Evaluation de la charge de travail du cheval d'attelage en compétition et à l'entraînement*, Thèse Doctorat Vétérinaire, Toulouse, 2002, p.56-78.

- THORNTON, J, ESSEN-GUSTAVSSON B et LINDHOLM A, « Effects of training and detraining on oxygen uptake, cardiac output, blood gas tensions, pH and lactates concentrations during and after exercise in the horse », *in* : *Equine exercise physiology 2* (1983), p. 206–214.
- THORNTON, J, PAGAN J et PERSSON S, « The oxygen cost of weight loading and inclined treadmill exercise in the horse trotters », *in* : *Equine Exercise Physiology 2* (1987), p. 206–214.
- UNIVERSITÉ DE LAVAL, 11-07-2016, URL : <http://www.ulaval.com>.
- VALETTE, JP et WOLTER R, « Intérêt des mesures de lactatémie et de fréquence cardiaque comme critères d'aptitudes sportives », *in* : *Compte-rendu de la 14ème Journée d'Etude, CEREOPA, Paris* (1988), p. 1–11.
- VALETTE, JP et BEDU S, « Etude de la récupération cardiaque chez les chevaux trotteurs à l'entraînement », *in* : *Equathlon 2*(8) (1990), p. 19–22.
- VANERCK, E, JAKESOVA V et LEKEUX P, « Field evaluation of poor performance in Standardbred trotters », *in* : *Pferdeheilkunde 22* (2006), p. 625–631.
- WILMORE, J et COSTIL D, *Physiologie du sport et de l'exercice physique*, Collection sciences et pratiques du sport, édition De Boeck, 1999, p. 64-80.
- WILSON, RG, ISLER RB et THORNTON JR, « Heart rate, lactic acid production and speed during a standardized exercise test in Standardbred horses », *in* : *Equine Exercise Physiology 1* (1983), p. 487–496.
- WOLTER, R, *Alimentation du cheval 2° édition*, Editions France Agricole, 1999, p.26-41.
- YOUNG, IS, ALEXANDER R et WOAKES AJ, « Synchronization of ventilation and locomotion in horses », *in* : *The J. Exp. Biol.* 66 (1992), p. 19–31.
- YOUNG, LE, MARLIN DJ et DEATON-BROWN-FELTNER H, « Heart size estimated by echography correlates with maximal oxygen uptake », *in* : *Equine Vet J.* 34 (2002), p. 4767–471.

CARACTÉRISATION DE LA CHARGE DE TRAVAIL DU CHEVAL DE SPORT : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DES LIENS ENTRE PARAMÈTRES PHYSIOLOGIQUES ET BIOMÉCANIQUES

NOM et Prénom : MOUCHEBOEUF Victoire

En vue de tester les performances d'un nouvel objet connecté dédié au cheval, le travail présenté s'attache à mettre en lien des caractéristiques physiologiques liées à l'effort avec des données biomécaniques. Dans une première partie bibliographique sont rappelées les bases de la physiologie de l'effort et les adaptations du cheval à l'entraînement. S'ensuit une synthèse des méthodes actuelles de test à l'effort permettant l'exploration de la charge de travail du cheval et son suivi médicosportif. Enfin, un nouvel outil disponible dans le monde du cheval de sport est présenté de manière détaillée : le capteur connecté *Equisense Motion*. Une seconde partie relate une étude réalisée dans le but d'explorer les relations entre les caractéristiques des allures mesurées par le capteur et l'intensité de l'effort déployé par les chevaux. Deux séances de travail de 28 minutes ont été comparées : l'une comportant 9 transitions d'allure (charge de travail supposée faible), l'autre comportant 42 transitions d'allure (charge de travail supposée élevée). Deux paramètres physiologiques (fréquence cardiaque (FC) et lactatémie) et 2 paramètres biomécaniques (cadence et rebond) ont été suivis chez 9 chevaux (5 chevaux de sport et 4 chevaux de loisir), chacun réalisant les 2 séances distinctes. L'étude n'a pas pu mettre en évidence de différence significative de charge de travail entre les 2 séances d'entraînement (pas de différence significative de FC et de lactatémie). Par contre, nous avons observé un effet du type de cheval sur les paramètres. Les chevaux de sport ont eu tendance à avoir une FC plus faible que les chevaux de loisir pendant l'entraînement au trot et au galop. Ils ont présenté une cadence plus faible et un rebond plus élevé au galop que les chevaux de loisir. Ainsi, nous n'avons pas pu montrer ici la capacité du capteur *Equisense Motion* à mesurer la charge d'effort chez le cheval mais celui-ci permet de caractériser la locomotion ce qui a un intérêt pour suivre l'évolution des performances au cours de l'entraînement.

Mots-clés : PHYSIOLOGIE - EFFORT - PHYSIOLOGIE DE L'EXERCICE - TEST D'EFFORT - ENTRAÎNEMENT - CAPTEUR - BIOMÉCANIQUE - PARAMÈTRE - ÉQUIDÉ - CHEVAL DE SPORT.

Jury :

Président : Pr

Directeur : Pr Fanny Pilot-Storck

Assesseur : Pr Bénédicte Grimard-Ballif

Invitée : Camille Saute

ATTEMPT AT CHARACTERIZING SPORT HORSES WORKLOAD : EXPERIMENTAL STUDY ON LINKS BETWEEN PHYSIOLOGICAL AND BIOMECHANICAL PARAMETERS

NAME and Surname : MOUCHEBOEUF Victoire

In order to evaluate the capacities of a new connected device dedicated to horses, this work aimed at analyzing the links between physiological parameters of exercise intensity with biomechanical parameters. A first bibliographical part summarizes the fundamentals of horse physiology and adaptations to training. Then, a synthesis reports the actual methods used to explore workload of sport horses. This part ends with the presentation of a new device in the equestrian world : the connected sensor *Equisense Motion*. A second part presents an experimental study attempting at linking the biomechanic parameters measured by the sensor during training and the corresponding workload. Two exercises of 28 minutes each were compared : one included 9 transitions (supposed to represent a low workload) and the other, 42 transitions (supposed to represent a high workload). Two physiological parameters (heart rate and blood lactates) and 2 biomechanical parameters (bounce and strides frequency) were measured in 9 horses (5 sport horses and 4 leisure horses), each of them performing both exercises. The study did not reach its aim since no significant difference of workload was found between the 2 types of exercise (no significant difference of heart rate and blood lactates). However, we observed a relationship between the type of horses and the recorded parameters. Sport horses had a tendency to a lower heart rate than leisure horses during training at trot and galop. Moreover, they showed a higher bounce and a lower strides frequency than leisure horses. In summary, we could not conclude on the sensor *Equisense Motion*'s capacity to measure workload in horses. Yet, it may help to follow the long-term evolution of locomotion in horse, which could be of interest to monitor the impact of training on performance.

Keywords :

PHYSIOLOGY - WORKLOAD - EXERCISE PHYSIOLOGY - EXERCISE TEST- TRAINING - SENSOR - BIOMECHANICS - PARAMETER- EQUINES - SPORT HORSES.

Jury :

President : Pr

Director : Pr Fanny Pilot-Storck

Assessor : Pr Bénédicte Grimard-Ballif

Guest : Camille Saute