

La fatigue de l'athlète - aspect méthodologique

Caractérisation de la locomotion du cheval au travail par capteurs embarqués

Par **Sophie BIAU** (IFCE), **Quentin TREBOT** (Institut PPRIME, UPR3346 CNRS Université de Poitiers), **Benoît PASQUIER** (IFCE), **Jean-François DEBRIL** (Crepes de Poitiers), **François DURAND** (Crepes de Poitiers), **Laetitia FRADET** (Institut PPRIME, UPR3346 CNRS Université de Poitiers)

Un état de l'art concernant la fatigue de l'athlète a été réalisé dans le cadre d'un projet en cours, dont l'objectif est de proposer une méthodologie d'évaluation *in situ* de l'état de forme du cheval. Il s'agit d'un travail mené à l'IFCE, en collaboration entre :

- Le plateau technique de Saumur d'une part,
- Et le Centre d'Analyse d'Images et Performance Sportive (CAIPS) d'autre part, composé de l'équipe du Centre de Ressources, d'Expertise et de Performance Sportive (CREPS) de Poitiers, associée aux chercheurs de l'équipe RoBioSS de l'institut Pprime de l'Université de Poitiers.

L'étude porte sur la caractérisation de la locomotion du cheval au travail par capteurs embarqués et plus particulièrement sur l'évolution de la locomotion avec la fatigue au cours d'une séance de travail, dans différentes disciplines équestres. Ce projet doit contribuer à aider les cavaliers à organiser leur séance d'entraînement, à évaluer la charge et à améliorer la planification de l'entraînement.

Généralités sur la fatigue

La littérature distingue deux types de fatigue. La première est la **fatigue pathologique** (Verdon *et al.*, 2006 ; Worth, 1985 ; McGowan *et al.*, 2008) conséquence d'une maladie ou du phénomène de surentraînement. Elle est présente pendant plusieurs semaines voire plusieurs mois. La seconde est la **fatigue physique ou mentale qui résulte d'un effort** et qui se manifeste pendant plusieurs heures ou jours. La suite de cet état de l'art concerne le second type de fatigue, puisqu'il s'agit de caractériser la fatigue dans le cadre d'une séance.

Les définitions suivantes de la fatigue établissent le phénomène à étudier :

« *Sensation accompagnant la baisse des fonctions athlétiques* » (Mami *et al.*, 2019)

« *Une réponse physiologique, complexe et intriquée à un exercice menant à l'incapacité de maintenir l'activité voulue à son intensité présente* » (Back et Clayton, 2013)

« *Toute réduction de la capacité d'exercer une force ou une puissance musculaire induite par l'exercice, que la tâche puisse être maintenue ou non* » (Hug et Dorel, 2009)

La fatigue est donc un terme général ayant des causes et des conséquences complexes et multiples. Elle décrit le **mécanisme biologique qui, à un moment, ne permet plus à l'athlète de continuer à effectuer une tâche physique voulue à une intensité donnée**. Le projet actuel s'intéresse en premier lieu aux conséquences au niveau locomoteur et non aux causes de la fatigue.

Caractérisation de la fatigue dans la littérature

Dans la littérature, différents types de variables sont proposés pour caractériser la fatigue. Certaines de ces variables sont plutôt reliées aux **aspects physiologiques à l'origine de la fatigue**. Dans ce cas, on retrouve :

- Des variables mesurables de la **fatigue physiologique**, en lien avec les mécanismes de fonctionnement des filières énergétiques :
 - * La quantité de **biomarqueurs sanguins** tels que le lactate, la créatine phosphokinase etc. (Mami *et al.*, 2019 ; Back et Clayton, 2013 ; Pradet et Hubiche, 1996 ; Cano *et al.*, 2001)
 - * La **température du corps** (Back et Clayton, 2013)
 - * La **fréquence cardiaque** (Pradet et Hubiche, 1996)
 - * La **consommation maximale d'oxygène** (Pradet et Hubiche, 1996)
- Des variables mesurables de la **fatigue de l'activation musculaire** :
 - * Les **tensions électriques** produites par les muscles étudiés (Hug et Dorel, 2009 ; Colborne *et al.*, 2001 ; Grosprêtre, 2018 ; Takahashi *et al.*, 2018)
- La **fatigue psychologique** : chez le cheval, le terme « fatigue » est utilisé lorsque la déclenchabilité d'une action faiblit. Cet aspect ne sera pas abordé dans la suite de l'étude.

Le second groupe de variables évoqué dans de nombreuses études contribue à caractériser la **dégradation de la locomotion avec la fatigue** mais aussi les facteurs qui l'impactent :

- **Variables cinématiques** (*i.e.* calcul d'angle, de vitesse, de déplacement... des marqueurs articulaires, des centres de gravité des segments et du corps entier) (Back et Clayton, 2013)
- **Caractéristiques anatomiques** (*i.e.* longueur et orientation des segments) (Magnusson *et al.*, 1990 ; Holmström *et al.*, 1990 ; Cano *et al.*, 2001)

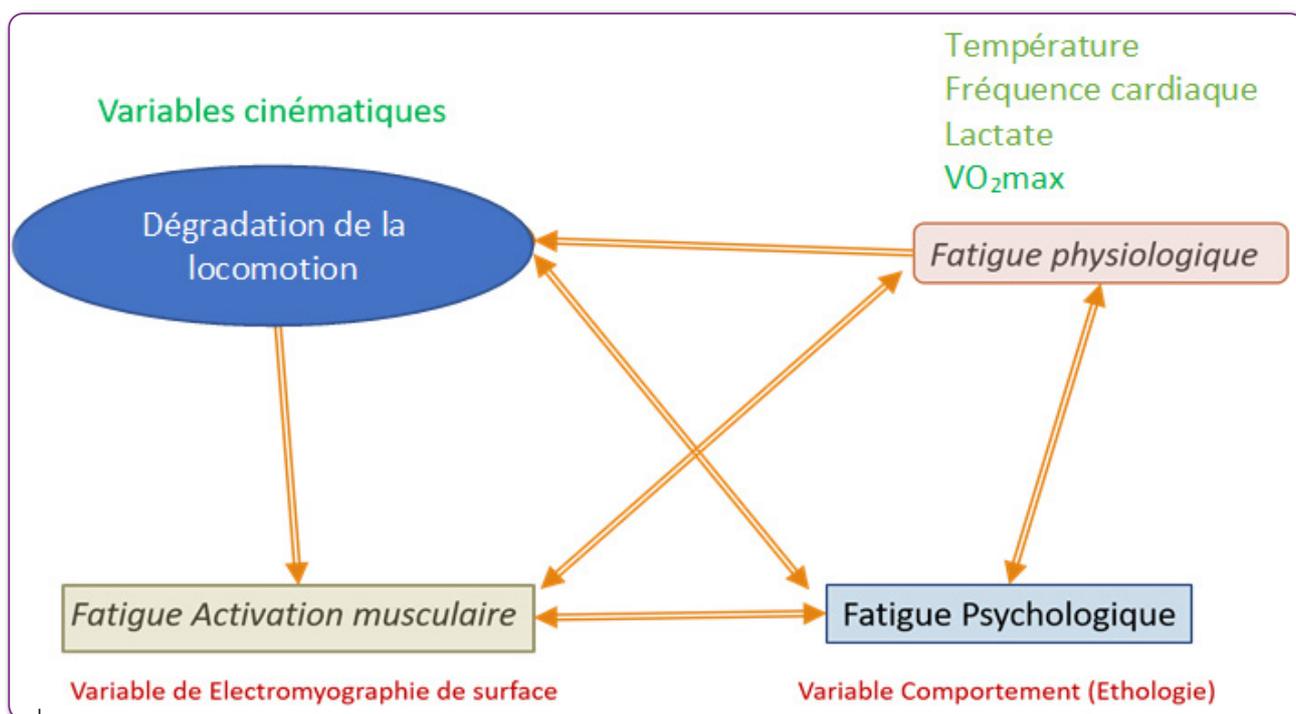


Figure 1 : Interdépendances des fatigues et variables facilement mesurables *in situ* (en vert)

La fatigue chez le cheval

Dans la littérature, la fatigue équine a également été étudiée sous l'angle de la **physiologie** (Mami *et al.*, 2019 ; Lacombe, 2001 ; Votion, 2007a ; Pagan, 1998 ; Votion *et al.*, 2007b ; Demirtas *et al.*, 2015) et de l'**activation musculaire** (Colborne, 2001 ; Takahashi *et al.*, 2018, 2020 ; Licka *et al.*, 2009 ; St George, 2017).

D'un point de vue locomoteur, la littérature est plus pauvre. Il a été montré que la fatigue impactait les paramètres spatio-temporels des allures :

- **Augmentation de la durée de la foulée** (Pugliese *et al.*, 2020)
- **Difficulté à maintenir la cadence** (Johnson, 1999)

L'étude la plus récente (Takahashi *et al.*, 2020) met en avant la **baisse de la fréquence de foulée à la fin des sessions de galop**, en lien avec une baisse d'activité électromyographique des muscles splenius et brachiocephalicus. L'**augmentation de l'extension du boulet** a également été citée comme conséquence de la fatigue. Le trot semble être aussi impacté par la fatigue, ce qui a été mis en évidence chez des chevaux d'endurance, avec une baisse de sa symétrie (Muñoz *et al.*, 2006). Cette **asymétrie** est pointée par la dégradation d'un indice calculé avec la durée de foulée des diagonaux. Il est à noter qu'à partir de variables cinématiques, plusieurs indices de symétrie de la locomotion ont été proposés (Hobbs *et al.*, 2010) mais ont jusqu'à présent été principalement exploités pour servir le diagnostic de boiterie (Pourcelot *et al.*, 1997 ; Back et Clayton, 2013 (p190) ; Bragança *et al.*, 2018). Ces indices s'intéressent à l'amplitude et l'accélération de mouvement et aux variables liées au domaine fréquentiel.

Il est possible de constater que, pour le cheval, l'analyse des paramètres cinématiques reste encore peu fréquente. Cela peut notamment s'expliquer par le fait que ce type d'analyses passe par la mise en place d'un protocole de fatigue qui soit compatible avec les moyens de mesure utilisés. Il est à noter que les techniques et outils d'analyses n'ont cessé d'évoluer (Bosch *et al.*, 2018 ; Hobbs *et al.*, 2010 ; DeMaré *et al.*, 2017 ; Bragança *et al.*, 2018 ; Morales-Acosta *et al.*, 2018) allant de l'enregistrement par caméra d'images 2D de chevaux en mouvement en ligne droite jusqu'à l'utilisation de centrales inertielles indiquant la cinématique des chevaux dans leurs conditions normales de mouvements (Martin *et al.*, 2017) en passant par l'utilisation de systèmes optoélectroniques analysant en 3D la cinématique de déplacement de chevaux sur tapis roulant (vitesse de locomotion contrôlée). Les derniers développements relatifs aux centrales inertielles laissent entrevoir de nouvelles possibilités qui devraient se traduire par un plus grand nombre d'études portant sur la dégradation de la locomotion du cheval sous l'effet de la fatigue. Ces études pourraient s'inspirer des nombreux travaux menés chez l'humain.

La fatigue chez l'homme

La détection et surveillance de la fatigue du sportif ont donc fait l'objet d'un grand nombre d'études chez l'homme. D'un point de vue moteur, elle a été étudiée en se focalisant aussi bien sur le haut du corps (bras, tête + cou, haut du tronc) que sur le bas du corps (membres postérieurs, bas du tronc). Pour le haut du corps, certaines études montrent que la fatigue entraîne un **changement de stratégie de compensation musculaire et posturale** afin de maintenir les performances pour la tâche demandée malgré la réduction des capacités physiques (Pritchard, 2019). Ce phénomène de compensation se traduit par l'**activation d'un autre muscle pour compenser le muscle fatigué** (Umehara, 2018), par la **dégradation de l'estimation du déplacement d'un membre fatigué** mais

sans dégradation de la précision (Mugnosso *et al.*, 2019) ou par le **changement de la cinématique au cours du temps** (en baseball par exemple) impactant la performance des lancers (Reiss, 2013a).

Comme pour le haut du corps, la fatigue du **bas du corps** montre un **changement de stratégie avec des phénomènes de compensation**. Il a été montré que les membres inférieurs soumis à la fatigue influent sur l'**amplitude des mouvements du tronc** (Soangra *et al.*, 2017). La fatigue impacte également la **qualité de réception des sauts** (Smeets *et al.*, 2019 ; Jayalath *et al.*, 2018). La fatigue des abducteurs de la hanche peut également modifier la **cinématique de l'articulation des chevilles et des genoux** lors de la réception de sauts (Gafner *et al.*, 2018). Lors de course à pied, la **capacité d'atténuation des chocs au contact du pied au sol** est altérée mais avec des variations inter individus (Strohrmann *et al.*, 2012 ; Mizrahi *et al.*, 2001). Il a également été montré, pour un effort de longue durée (marathon), que l'apparition de la fatigue peut être anticipée en adoptant une stratégie optimale avant l'apparition de la fatigue (Matta *et al.*, 2019).

Cet état de l'art chez l'homme donne des pistes à exploiter chez le cheval. D'une part une dégradation locale peut être un indice pour détecter une fatigue généralisée. D'autre part, une bonne connaissance des stratégies de coordination permettrait d'anticiper une dégradation d'allure et donc de la performance, et de prévenir des blessures musculo-squelettiques, trop fréquentes chez le cheval de sport.

Le traitement ne doit pas s'arrêter à des calculs d'indice de symétrie locaux. Il doit tendre vers un modèle de fatigue par le biais d'outils algorithmiques avancés comme les algorithmes d'apprentissage ou de statistique. Ceux-ci sont déjà utilisés dans l'analyse de la locomotion chez l'homme. Ces outils commencent aussi à être utilisés pour les disciplines équestres pour détecter allures et boiteries. La suite du projet est en cours en ce sens.



© IFCE

Références

- BACK W. and CLAYTON H.M.** (2013). Equine Locomotion-E-Book. *Elsevier Health Sciences*. DOI : 9780702058547
- BOSCH S., SERRA BRAGANÇA F., MARIN-PERIANU M. et al.** (2018). EquiMoves : A wireless networked inertial measurement system for objective examination of horse gait. *Sensors (Basel)*, 18(3), page 850. DOI : 10.3390/s18030850
- BRAGANÇA F.M.S., RHODIN M. and VAN WEEREN P.** (2018). On the brink of daily clinical application of objective gait analysis : What evidence do we have so far from studies using an induced lameness model ? *The Veterinary Journal*, 234, pages 11-23. DOI : 10.1016/j.tvjl.2018.01.006.
- CANO M.R., VIVO J., MIRO F., MORALES J.L. and GALISTEO A.M.** (2001). Kinematic characteristics of Andalusian, Arabian and Anglo-Arabian horses : a comparative study. *Research in Veterinary Science*, 71(2), pages 147-153.
- CLAYTON H.M. and VAN WEEREN P.R.** (2013). Performance in equestrian sports. In : *Equine locomotion*. Saunders Elsevier, Oxford, pages 305-340.
- COLBORNE G.R., BIRTLES D.M. and CACCHIONE I.C.** (2001). Electromyographic and kinematic indicators of fatigue in horses : a pilot study. *Equine Veterinary Journal*, 33(S33), pages 89-93.
- DE MARÉ L., BOSHUIZEN B., PLANCKE L., DE MEE C., DE BRUIJN M. and DELESALLE C.** (2017). Standardized exercise tests in horses : current situation and future perspectives. *Vlaams Diergeneeskundig Tijdschrift*, 86(2), pages 63-72.
- DEMIRTAS B., YARAMIS PARKAN C. and ATMACA M.** (2015). Exercise-induced physiological fatigue in horses. *Turkiye Klinikleri Journal of Veterinary Sciences*, 6(2), pages 60-66.
- GAFNER S.C., HOEVEL V., PUNT I.M., SCHMID S., ARMAND S. and ALLET L.** (2018). Hip-abductor fatigue influences sagittal plane ankle kinematics and shank muscle activity during a single-leg forward jump. *J. Electromyogr. Kinesiol.*, 43, pages 75-81. DOI : 10.1016/j.jelekin.2018.09.004
- GROSPRÊTRE S.** (2018). <https://www.acaps.asso.fr/lelectromyographie-de-surface/#prettyPhoto>
- HOBBS S., LEVINE D., RICHARDS J., CLAYTON H., TATE J. and WALKER R.** (2010). Motion analysis and its use in equine practice and research. *Wiener tierärztliche Monatsschrift*, 97, pages 55-64.
- HOLMSTRÖM M., FREDRICSON I. and DREVEMO S.** (1994). Biokinematic analysis of the Swedish Warmblood riding horse at trot. *Equine Veterinary Journal*, 26(3), pages 235-240.
- HOLMSTRÖM M., MAGNUSSON L.E. and PHILIPSSON J.** (1990). Variation in conformation of Swedish Warmblood horses and conformational characteristics of elite sport horses. *Equine Veterinary Journal*, 22(3), pages 186-193.
- HUG F. and DOREL S.** (2009). Electromyographic analysis of pedaling : a review. *Journal of electromyography and Kinesiology*, 19(2), pages 182-198.
- JAYALATH J.L.R., DE NORONHA M., WEERAKKODY N. and BINI R.** (2018). Effects of fatigue on ankle biomechanics during jumps : a systematic review. *J. Electromyogr. Kinesiol.*, 42, pages 81-91. DOI : 10.1016/j.jelekin.2018.06.012. PMID : 29980104.
- LICKA T.F., FREY A. and PEHAM C.** (2009). Electromyographic activity of the longissimus dorsi muscles in horses when walking on a treadmill. *The Veterinary Journal*, 180(1), pages 71-76.

- MAGNUSSON L.E. and THAFVELLIN B.** (2010). Studies on the conformation and related traits of Standardbred Trotters in Sweden. *Journal of Animal Breeding and Genetics*, 107, pages 135-148. DOI : 10.1111/j.1439-0388.1990.tb00019.x.
- MAMI S., KHAJE G., SHAHRIARI A. and GOORANINEJAD S.** (2019). Evaluation of biological indicators of fatigue and muscle damage in Arabian Horses after race. *J. Equine Vet. Sci.*, 78, pages 74-78. DOI : 10.1016/j.jevs.2019.04.007
- MARTIN P., CHEZE L., POURCELOT P., DESQUILBET L., DURAY L. and CHATEAU H.** (2017). Effects of the rider on the kinematics of the equine spine under the saddle during the trot using inertial measurement units : Methodological study and preliminary results. *The Vet. J.*, 221, pages 6-10. DOI : 10.1016/j.tvjl.2016.12.018
- MATTA G.G., BOSSI A.H., MILLET G.Y., LIMA P., DE LIMA J.P.D. and HOPKER J.G.** (2019). Influence of a slow-start on overall performance and running kinematics during 6-h ultramarathon races. *European journal of sport science*, pages 1-10.
- McGOWAN C.M. and WHITWORTH D.J.** (2008). Overtraining syndrome in horses. *Comparative Exercise Physiology*, 5(2), pages 57-65. DOI : 10.1017/S1478061508979202
- MIZRAHI J., VERBITSKY O. and ISAKOV E.** (2001). Fatigue-induced changes in decline running. *Clinical biomechanics*, 16(3), pages 207-212.
- MORALES-ACOSTA L., ORTIZ-PRADO A., JACOBO-ARMENDÁRIZ V.H. and GONZÁLEZ-CARBONELL R.A.** (2018). Analysis and characterization of the normal gait phases of walking Warmblood horses as a tool for the diagnosis of lameness. *Pesquisa Veterinária Brasileira*, 38(3), pages 536-543.
- MUGNOSSO M., ZENZERI J., HUGHES C.M.L. and MARINI F.** (2019). Coupling robot-aided assessment and surface electromyography to evaluate the effect of muscle fatigue on wrist position sense in the flexion-extension plane. *Frontiers in human neuroscience*, 13, page 396.
- MUÑOZ A., CUESTA I., RIBER C., GATA J., TRIGO P. and CASTEJÓN F.M.** (2006). Trot asymmetry in relation to physical performance and metabolism in equine endurance rides. *Equine Veterinary Journal*, 38(S36), pages 50-54.
- PAGAN J.** (1998). Energy and the performance horse. *Liver*, 90, page 220.
- POURCELOT F., AUDIGIÉ F., DEGUEURCE C., DENOIX J.M. and GEIGER D.** (1997). Kinematic symmetry index : a method for quantifying the horse locomotion symmetry using kinematic data. *Veterinary Research, BioMed Central*, 28(6), pages 525-538.
- PRADET M. and HUBICHE J.L.** (1996). La préparation physique. *INSEP-Publ.*
- PUGLIESE B.R., CARBALLO C.T., CONNOLLY K.M., MAZAN M.R. and KIRKER-HEAD C.A.** (2020). Effect of fatigue on equine metacarpophalangeal joint kinematics - A single horse pilot study. *J. Equine Vet. Sci.*, 86, page 102849.
- SMEETS A., VANRENTERGHEM J., STAES F. and VERSCHUEREN S.** (2019). Match play-induced changes in landing biomechanics with special focus on fatigability. *Med. and Sci. in Sports and Exerc.*, 51(9), pages 1884-1894. DOI : 10.1249/MSS.0000000000001998
- SOANGRA R., MOON S., REZVANIAN S. and LOCKHART T.E.** (2017). Lower extremity muscle fatigue influences nonlinear variability in trunk accelerations. *Biomedical sciences instrumentation*, 53, page 47.

ST GEORGE L.B. (2017). Electromyographic evaluation of muscle firing patterns in the ridden horse during jumping as an objective method of informing current jump training programmes. Thèse de doctorat, University of Central Lancashire.

STROHRMANN C., HARMS H., KAPPELER-SETZ C. and TRÖSTER G. (2012). Monitoring kinematic changes with fatigue in running using body-worn sensors. *IEEE transactions on information technology in biomedicine*, 16(5), pages 983-990. DOI : 10.1109/TITB.2012.2201950

TAKAHASHI Y., MUKAI K., OHMURA H. and TAKAHASHI T. (2020). Do muscle activities of M. splenius and M. brachiocephalicus decrease because of exercise-induced fatigue in Thoroughbred Horses ? *J. of Equine Vet. Sci.*, 86, page 102901. DOI :10.1016/j.jevs.2019.102901

TAKAHASHI Y., MUKAI K., MATSUI A., OHMURA H. and TAKAHASHI T. (2018). Electromyographic changes in hind limbs of Thoroughbreds with fatigue induced by treadmill exercise. *American journal of veterinary research*, 79(8), pages 828-835. DOI : 10.2460/ajvr.79.8.828

VOTION D. (2007). Spécificités musculaires du cheval d'endurance : réponse à l'exercice et à l'entraînement. In : *Proceedings : Journée AVEF (Association des Vétérinaires Equins Français)*, pages 106-110.

VOTION D., NAVET R., LACOMBE V., SLUSE F., ESSÉN-GUSTAVSSON B., HINCHCLIFF K. and VALBERG S. (2007). Muscle energetics in exercising horses. *Equine and Comparative Exercise Physiology*, 4(3-4), pages 105-118. DOI : 10.1017/S1478061507853667

VERDON F., GUESSOUS I., CORNUZ J. et FAVRAT B. (2006). Fatigue : revue et approche diagnostique. *Revue médicale Suisse*, 2(89), pages 2725-2731.